

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI



FAKULTA STROJNÍ  
KATEDRA MATERIÁLU

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 3911R018 Materiály a technologie

Zaměření: Materiálové inženýrství

**Optimalizace procesu tepelného zpracování dílů převodovky z  
hlediska deformací**

**Optimization of heat treatment of parts in terms of transmission  
distortion**

**KMT – B – 168**

**Jan Kracík**

Vedoucí práce:	Ing. Adam Hotař, Ph.D. – TU v Liberci
Konzultant:	Ing. Petr Šťastný – ŠKODA AUTO a.s.
Počet stran:	53
Počet tabulek:	4
Počet obrázků:	27
Počet grafů:	6
Počet příloh:	6

Datum: 14. 5. 2011

## **Anotace:**

Tato práce se zabývá vlivem tepelného zpracování na deformace otvoru hnaného kola převodovky. Dále je provedeno vyhodnocení naměřených výsledků s cílem navrhnout optimální geometrii zpracovávané součásti tak, aby byla vhodná pro kalení v oleji a v přetlaku plynu.

**Klíčová slova:** kalení, cementace, vakuum, deformace

## **Annotation:**

This thesis examines the impact of heat treatment on deformation of hole of driven wheel transmission. It is an evaluation of the measured results to design the optimal geometry of the processed parts to be suitable for quenching in oil and gas pressure quenching.

**Key words:** quenching, carburizing, vakuum, distortion

## **Bibliografická citace**

KRACÍK, J. Optimalizace procesu tepelného zpracování dílů převodovky z hlediska deformací. Liberec, 2011. 53 s. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Adam Hotař, Ph.D.

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 21. 5. 2011

Podpis: .....

## **Poděkování**

Děkuji všem osobám, které mi pomáhali nebo poskytli užitečné informace a osobní poznatky při vypracování mé bakalářské práce. Dílčí poděkování patří vedoucímu mé práce panu Ing. Adamu Hotařovi, Ph.D a mému konzultantovi Ing. Petru Šťastnému. Dále bych chtěl poděkovat všem blízkým osobám a známým, kteří mě podporovali po celou dobu studia.

# OBSAH

Obsah .....	7-8
<b>1. Úvod a cíl práce .....</b>	<b>9</b>
<b>2. Teoretická část .....</b>	<b>10-30</b>
2.1. Teorie tepelného zpracování .....	10
2.2. Kalení .....	11
2.2.1. Martenzitická přeměna .....	12
2.2.2. Bainitická přeměna .....	14
2.2.3. Kalicí média .....	15
2.2.4. Vakuové kalení .....	17
2.3. Popouštění .....	17
2.4. Chemicko-tepelné zpracování ocelí .....	18
2.4.1. Cementace .....	18
2.4.2. Vakuová cementace .....	22
2.4.3. Nitrocementace .....	23
2.4.4. Ochranná prostředí .....	24
2.5. Napětí v materiálu a deformace .....	26
2.6. Zkoušky tvrdosti .....	28
2.6.1. Vickersova zkouška tvrdosti .....	28
2.6.2. Zkouška mikrotvrdosti .....	29
<b>3. Experimentální část .....</b>	<b>31-39</b>
3.1. Použitý materiál .....	31
3.2. Zařízení pro tepelné zpracování .....	32
3.2.1. Zařízení pro atmosférickou cementaci a kalení v oleji .....	32
3.2.2. Zařízení pro vakuovou cementaci a kalení v přetlaku plynu .....	33
3.3. Příprava vzorků a postup měření .....	36
3.3.1. Příprava a měření vzorků .....	36
3.3.2. Měření deformací .....	38
3.3.3. Měření tvrdosti .....	38
3.3.4. Měření mikrotvrdosti .....	38
3.3.5. Metalografický rozbor .....	39

<b>4. Výsledky a jejich vyhodnocení</b>	40-50
4.1. Výsledky deformací	40
4.1.1. Výsledky deformací v oleji	40
4.1.2. Výsledky deformací ve vakuu	42
4.2. Výsledky tvrdosti	44
4.3. Výsledky mikrotvrdosti	45
4.4. Porovnání metalografie	45
4.5. Srovnání ekonomiky provozu atmosférické cementace s kalením v oleji	
4.6. a vakuové cementace s kalením v přetlaku plynu	48
<b>5. Diskuse</b>	49
<b>6. Závěr</b>	50
<b>7. Seznam použité literatury</b>	51-52
<b>8. Seznam příloh</b>	53

## 1. Úvod a cíl práce

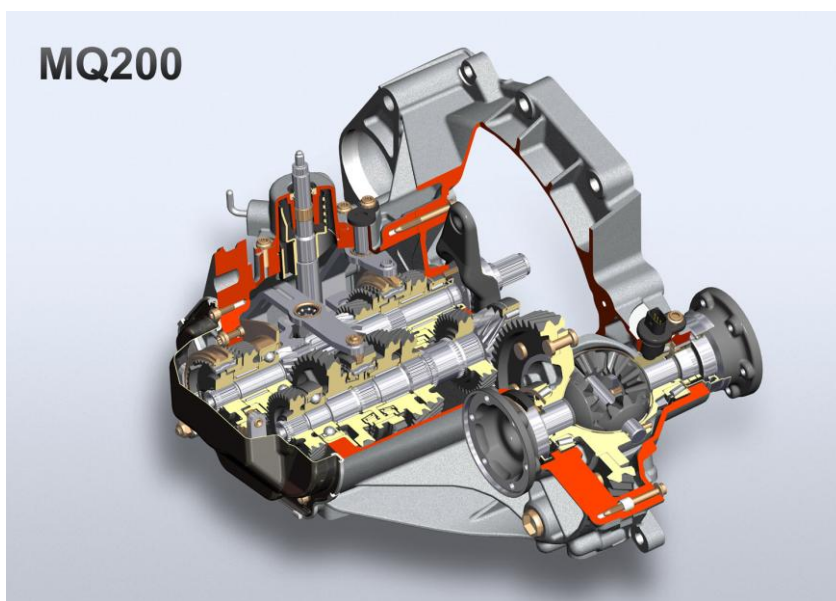
Práce se zabývá posouzením vlivu tepelného zpracování na chování ozubeného kola převodovky z hlediska deformací.

Ozubená kola převodových ústrojí přenáší vysoké točivé momenty a patří k nejnamáhavějším strojním součástem. Proto jsou kladeny na ozubená kola požadavky vysoké tvrdosti povrchu, otěruvzdornosti, únavové pevnosti a kontaktní únavové pevnosti. Dále je požadována dobrá houževnatost jádra a dostatečné pevnosti v tahu a ohybu. Je velice důležité věnovat tepelnému zpracování těchto součástí patřičnou pozornost. Vliv na výsledné vlastnosti má kromě tepelného zpracování ještě volba výchozího materiálu a mechanické opracování před tepelným zpracováním. [17]

Vlastní experiment byl prováděn ve spolupráci s firmou Škoda Auto a.s. a jednalo se o práci na hale M2 a kalírně. Zkoumaly se deformace vnitřního otvoru vzniklé u hnaného kola rozvodovky z materiálu TL 4521 (20NiMoCr6), které je součástí agregátu MQ 200. Byly porovnávány deformace rozměrové (stažení) a tvarové (ovalita). Zobrazení převodovky MQ 200 v řezu s hnaným kolem rozvodovky je na obr. 1.1. [9]

Prvním způsobem tepelného zpracování byla standardní cementace v plynu s následným kalením v oleji. Dále následovalo praní součástí a nízkoteplotní popouštění. Druhým způsobem tepelného zpracování byla cementace ve vakuu s kalením v přetlaku plynu. Zpracováním ve vakuu lze proces cementace značně urychlit z důvodu možnosti použití vyšších teplot až nad 1000 °C. Tento způsob tepelného zpracování je v Mladoboleslavské automobilce nově zaveden a do provozu byl uveden na počátku roku 2011. [15, 16]

Cílem zkoumání bylo nalézt proces vakuového tepelného zpracování, který by byl z hlediska deformací ozubeného kola obdobný s procesem atmosférické cementace s kalením v oleji. Dále bylo potřeba nalézt průměr vnitřního otvoru kola, který by se přibližně vyskytoval po tepelném zpracování v předepsaných mezích bez ohledu na to, jestli byly součásti zpracovány atmosférickou nebo vakuovou cementací.



Obr. 1.1. Převodovka MQ 200 v řezu [9]

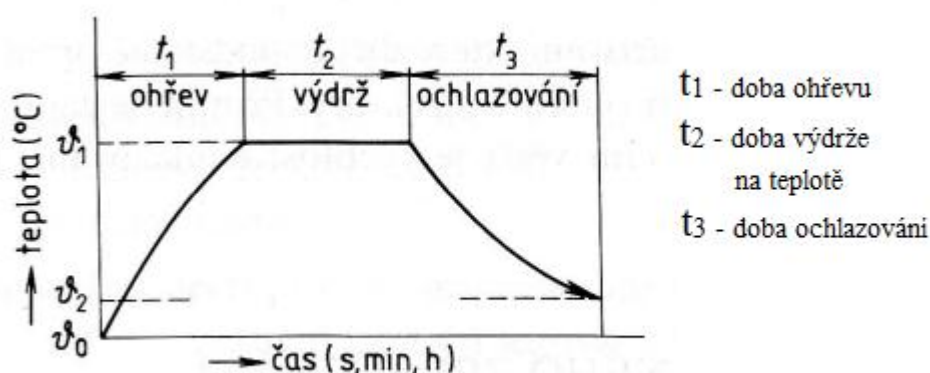


## 2. Teoretická část

### 2.1. Teorie tepelného zpracování

Tepelné zpracování je jednou z možností jak získat požadované vlastnosti daného materiálu. Jedná se zde o změnu struktury, rozložení jednotlivých fází a jejich procentuální zastoupení. Těmito změnami lze měnit jak mechanické, tak i technologické a fyzikální vlastnosti oceli. Při tepelném zpracování může využívat nejen čistě tepelných účinků, ale i mechanického působení za zvýšené teploty a také změn chemického složení povrchu.

Tepelné zpracování se skládá ze 3 základních kroků a těmi jsou ohřev na určitou teplotu, výdrž na této teplotě a ochlazení materiálu v tuhém stavu (obr. 2.1).



Obr. 2.1. Schéma průběhu tepelného zpracování [6]

V praxi se většinou tyto kroky několikrát opakují. Při ohřevu a ochlazení hraje velkou roli rychlost, čímž lze účelně řídit vznik jednotlivých fází a jejich procentuální zastoupení v materiálu. Proces tepelného zpracování je ve velké míře závislý na difuzi. Obecně také platí, že čím je větší rychlost ochlazení, tím více je difuze potlačena. K tomu, aby difuze mohla efektivně probíhat, je zapotřebí dostatečně vysoká teplota a výdrž na této teplotě. Podle charakteru, zda-li difuze může probíhat nebo je částečně či úplně potlačena, dělíme tepelné zpracování do 2 základních skupin:

1. **Rovnovážné tepelné zpracování** - zde difuze probíhá a lze sem zařadit např. žíhání
2. **Nerovnovážné tepelné zpracování** - difuze částečně nebo zcela omezena, např. kalení

Při rovnovážném tepelném zpracování je obvykle výsledná struktura oceli tvořena feritem, perlitem, cementitem nebo jejich kombinacemi. Pokud dosáhneme nerovnovážných podmínek zvýšením rychlosti ochlazení, tak lze ve struktuře pozorovat martenzit nebo bainit.

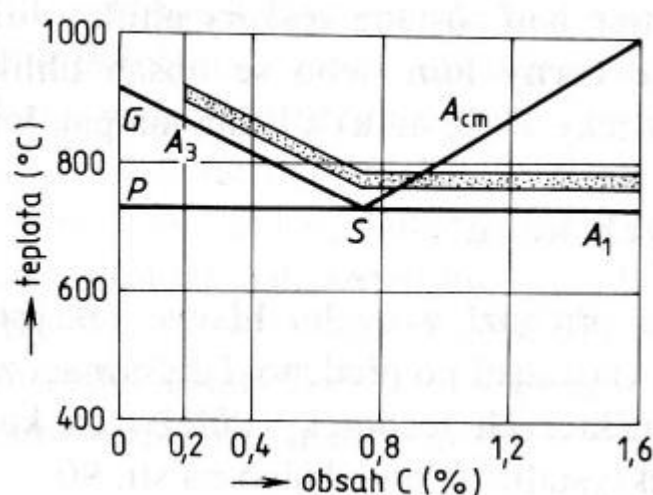
Je-li tepelné zpracování doprovázeno mechanickou deformací, tak hovoříme o tepelně mechanickém zpracování, a podle toho, při jaké teplotě k deformaci dochází, jej dělíme na 2 základní způsoby. Pokud je materiál zpracováván v oblasti stabilního austenitu, tak se jedná o vysokoteplotní tepelně mechanické zpracování. Tepelně mechanické

zpracování v oblasti nestabilního austenitu je označováno jako nízkoteplotní. Dále existuje plná škála metod tohoto způsobu tepelného zpracování. K nejznámějším patří tzv. isoforming. Zde dochází k deformaci při konstantní teplotě v oblasti perlitické, někdy i bainitické přeměny. Deformace tedy probíhá současně s fázovou přeměnou.

V případě, že působíme na ocel za zvýšené teploty vhodným prostředím tak, abychom obohatili jeho povrch o některý z chemických prvků, jedná se o chemicko-tepelné zpracování. Například sem patří procesy cementování, nitridování, nitrocementování, karbonitridování, sulfidování, sulfonitridování, boridování apod. K nejčastějším z uvedených způsobů patří cementování a nitridování, kde se jedná o sycení povrchu oceli uhlíkem, resp. dusíkem. [1, 6]

## 2.2. Kalení

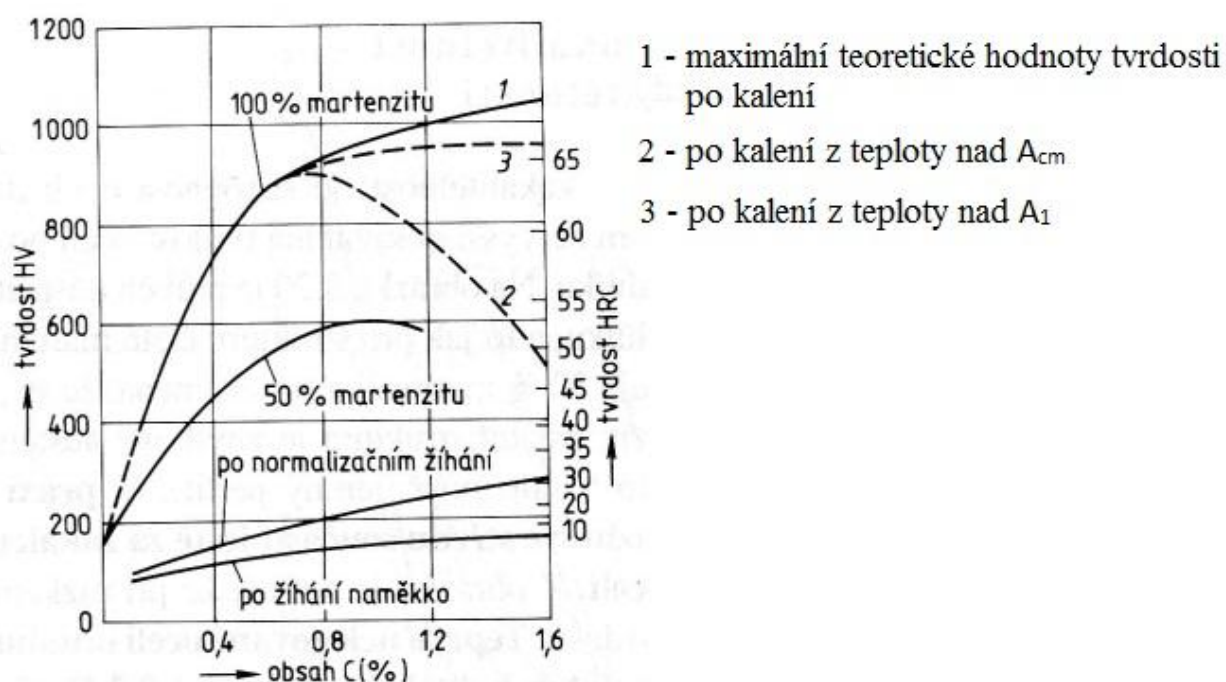
Tento nerovnovážný způsob tepelného zpracování se používá u ocelí ke zvýšení tvrdosti a ořezavzdornosti. U kalení jde o dosažení vhodné struktury, která je příčinou vysoké tvrdosti, a to struktury martenzitické nebo bainitické. V diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C se volí kalicí teploty asi 30 až 50 °C nad A<sub>3</sub> u podeutektoidních ocelí a u nadeutektoidních ocelí 30 až 50 °C nad A<sub>1</sub>, jak je patrné z obr. 2.2.



Obr. 2.2. Oblasti vhodných kalících teplot v diagramu Fe - Fe<sub>3</sub>C [6]

Pokud by u podeutektoidních ocelí byly teploty v oblasti pod A<sub>3</sub>, výsledná struktura by byla tvořena martenzitem a feritem a součást by po zakalení vykazovala velké vnitřní pnutí a sníženou tvrdost. U ocelí nadeutektoidních nejdeme s teplotami nad A<sub>cm</sub>, protože by došlo k rozpuštění sekundárního cementitu, který nám zvyšuje tvrdost zakalené součásti. Dále při těchto teplotách hrubne zrna a ve struktuře je po kalení větší množství zbytkového austenitu. U speciálních ocelí s karbidotvornými prvky se kalicí teploty volí vyšší s ohledem na rozpustnost jednotlivých karbidů. K dosažení martenzitické resp. bainitické struktury není vždy třeba vysoká rychlost ochlazování součásti. Existují oceli s vhodným tvarem ARA diagramu, které se zakalí na klidném vzduchu. Takové oceli jsou označovány jako samokalitelné.

S kalením je spojeno několik pojmů týkajících se vlastností kaleného materiálu, které jsou často nesprávně zaměňovány. Nejdůležitějším pojmem při kalení je **kalitelnost**, což je schopnost daného materiálu dosáhnout nerovnovážné struktury. Zde je důležitý procentuální obsah uhlíku. Při obsahu menším než 0,2 % C jsou oceli nekalitelné, naopak za dobře kalitelné se považují oceli s obsahem větším než 0,35 % C. Dalším z pojmů je **zakalitelnost**. Zakalitelností je schopnost materiálu dosažení maximální tvrdosti v závislosti na teplotě a procentuálním obsahu uhlíku. Posledním z nejdůležitějších pojmů je **prokalitelnost**, která je definována jako schopnost dosažení v určité hloubce od povrchu tvrdosti, která odpovídá 50 % martenzitu ve struktuře zakalené součásti. Na obr. 2.3 je znázorněn průběh tvrdosti v závislosti na obsahu uhlíku při různých kalících teplotách. [6]

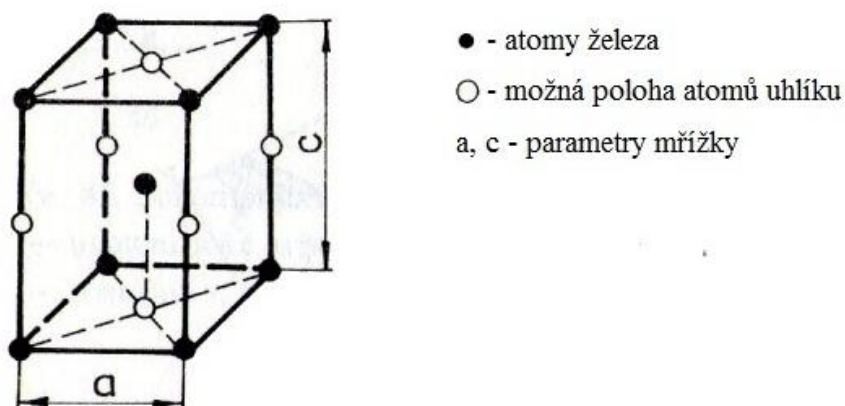


Obr. 2.3. Tvrdost nelegovaných ocelí v kaleném a žíhaném stavu v závislosti na obsahu uhlíku [6]

### 2.2.1 Martenzitická přeměna

Tato přeměna nastává za nerovnovážných podmínek. Podstatou je vznik silně přesyceného tuhého roztoku v železe  $\alpha$ , zvaného martenzit. Martenzit vzniká tzv. střižovou transformací z železa  $\gamma$  (austenitu), tj. přesun atomů se uskutečňuje o vzdálenost kratší než meziatomovou. A protože se jedná o bezdifuzní proces, tak je výchozí chemické složení austenitu shodné s nově vzniklým tuhým roztokem. Krystalografická mřížka se změní z krychlové plošně středěné na tetragonální prostorově středěnou, ve které je uzavřeno v intersticiálních polohách poměrně velké množství atomů uhlíku, což se navenek projevuje zvýšenou tvrdostí a křehkostí součásti (velká vnitřní pnutí). Mírou přesycení tuhého roztoku je stupeň tetragonality, který je vyjádřen jako poměr parametrů mřížky  $c/a$  (obr. 2.4). S rostoucím poměrem parametrů roste přesycení přibližně lineárně. Příčinou zvýšené tvrdosti je intersticiální přísada (v případě ocelí uhlík, popř. dusík) v určité minimální koncentraci.

U slitin se substitučními přísadami nebyl pozorován znatelný nárůst tvrdosti. To platí i pro uhlík do koncentrace 0,2 %.

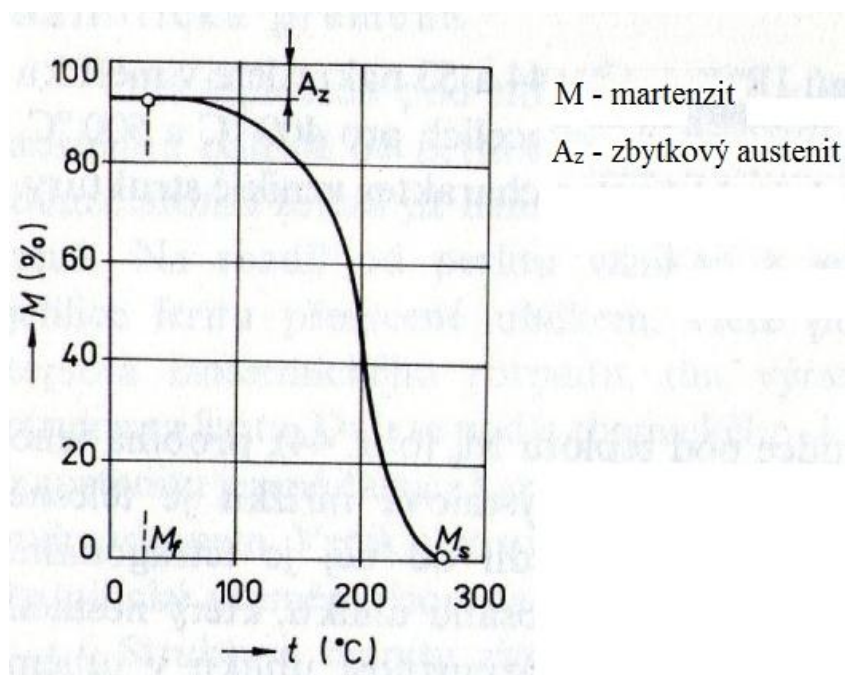


Obr. 2.4. Mřížka martenzitu [2]

Dle substrukтуры rozdělujeme martenzit na dva druhy. Prvním je dislokační martenzit, kde k plastické deformaci dochází skluzem jednotlivých rovin. Dislokační martenzit je pevný, ale houževnatý a je tvořen jehlicemi. Vzniká přibližně do 0,2 % C. Druhým je dvojčatový martenzit (vzniká dvojčatěním), který je pevnější a křehčí. Má deskovou morfologii a znatelně se uplatňuje od koncentrace 0,4 % C. V rozmezí 0,2 až 0,4 % C vzniká směs dislokačního a dvojčatového martenzitu.

Martenzitická přeměna probíhá vždy za vysokých rychlostí ochlazování, kdy v některých případech se rychlost růstu jednotlivých krystalů blíží k rychlosti šíření zvuku v oceli. Tato přeměna není závislá na čase, ale pouze na míře přechlazení. Začíná překročením teploty  $M_s$  (z angl. start) a je ukončena po dosažení teploty  $M_f$  (z angl. finish). Na teploty  $M_s$  a  $M_f$  má výrazný vliv koncentrace uhlíku a procentuální zastoupení legujících prvků. Většina prvků teploty začátku a konce martenzitické přeměny snižuje (Co a Al teploty naopak zvyšují). Při více jak 0,6 % C leží  $M_f$  pod 0 °C. Blíže charakterizuje přeměnu austenitu na martenzit martenzitická křivka na obrázku 2.5, z níž je také patrné, že tato přeměna není úplná a vždy se ve výsledné struktuře vyskytuje určité množství austenitu.

Tento austenit se nazývá zbytkový a může být z hlediska konečných vlastností ocelí nepříznivý, protože snižuje pevnost a rozměrovou stálost. Jeho obsah roste pomalým ochlazováním nebo prodlevou mezi teplotami  $M_s$  a  $M_f$ . Zbytkový austenit je třeba snížit, a to se v praxi uskutečňuje popouštěním zakalené oceli nebo zmrazením (u ocelí s  $M_f$  pod bodem mrazu). [2, 3]



Obr. 2.5. Závislost rozsahu martenzitické přeměny na teplotě [2]

### 2.2.2. Bainitická přeměna

Při menší rychlosti ochlazování, než je potřeba ke vzniku martenzitu, dochází ke vzniku nelamelární feriticko-karbidické směsi zvané bainit. Mezi teplotami cca 550 až 350 °C vzniká bainit horní a mezi teplotami 350 °C až  $M_s$  dochází ke vzniku dolního bainitu. Jedná se o částečně difuzní přeměnu, kdy je umožněna pouze difuze intersticiálních atomů uhlíku. Difuze atomů železa a substitučních přísad je omezena. Bainitická přeměna má z části společné znaky s perlitickou a z části s martenzitickou přeměnou. Společného s perlitickou přeměnou má zejména inkubační dobu přeměny a pomalý růst bainitického feritu. Martenzitické znaky jsou vznik povrchového reliéfu, desková či jehlicovitá morfologie bainitického feritu a obdoba bainitické křivky s martenzitickou, z čehož plyne, že tato přeměna také nemusí být úplná a ve výsledné struktuře se nachází zbytkový austenit.

Jak již bylo uvedeno výše, struktura bainitu je závislá na teplotě přeměny, a dle toho pak vzniká horní nebo dolní bainit. Horní bainit, který vzniká za vyšších teplot, je tvořen svazkem hrubších jehlic (laťek) bainitického feritu, které rostou na hranicích zrn austenitu nebo na již vzniklých jehlicích. Cementit je vyloučen přednostně na povrchu jehlic a precipituje v určité vzdálenosti za čelem hranice. Za teplot nižších dochází ke vzniku dolního bainitu. Ten se skládá z jemných desek bainitického feritu, které rovněž rostou převážně od hranic austenitických zrn. Zde dochází nejprve k vylučování karbidu  $\epsilon$ . Ten je později nahrazen cementitem. Karbid  $\epsilon$  se přednostně vylučuje uvnitř desek bainitického feritu. Dolní bainit je více přesycen uhlíkem než bainit horní a to se projevuje zvýšenou tvrdostí a křehkostí, ale naopak sníženou houževnatostí.

Bainitické struktury nedosahují tak vysokých hodnot tvrdosti jako struktury martenzitické, ale jsou houževnatější a v porovnání s perlitickými strukturami výrazně tvrdší a pevnější. [3]

### 2.2.3. Kalicí média

Pokud chceme zpracovávanou součást kalit, je třeba zvolit vhodné kalicí prostředí. V dnešní době již existuje mnoho kalících médií, zpravidla v kapalném nebo v plynném skupenství. Volba prostředí je závislá na druhu materiálu, požadované struktuře a také na velikosti a tvaru kalené součásti.

Nejlevnějším kalícím prostředím je voda (20 až 30 °C), která má velkou ochlazovací schopnost v oblasti perlitické i martenzitické přeměny. Voda se používá pro výrobky z uhlíkových ocelí nebo pro velké součásti z legovaných ocelí.

Dalším kapalným prostředím je olej, který má v porovnání s vodou ochlazovací schopnost nižší. Do oleje se kalí převážně součásti z legovaných ocelí nebo součásti malých rozměrů z uhlíkových ocelí. Nevýhodou těchto dvou kalících prostředí je vznik parního polštáře při ponoření součásti do kalicí lázně. Parní polštář lze do jisté míry omezit relativním pohybem kalené součásti a kalicí lázně.

Mezi další prostředí vhodná ke kalení patří roztoky polymerů, solné a kovové lázně. U většiny z těchto prostředí kromě vody je nevýhodou jejich negativní vliv na životní prostředí a s tím spojené náklady na jejich recyklaci, případně odstranění.

Nejmírnějším ochlazovacím prostředím je vzduch. Oceli kalitelné na volném vzduchu se nazývají samokalitelné a jsou to především oceli vysokolegované. Ochlazovací účinnost vzduchu lze zvýšit například použitím vodní mlhy.

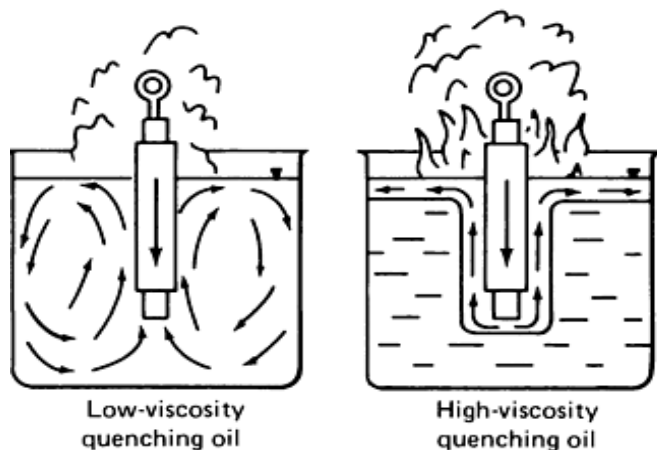
V posledních letech se rozšířilo v souvislosti se zaváděním tepelného zpracování ve vakuu kalení v přetlaku plynu. Kalicí plyny mají velkou výhodu oproti ostatním kalícím prostředím, a to je skutečnost, že neznečišťují okolí, dají se regenerovat a součásti zůstávají čisté. [3, 10, 11]

### Olej

Jako kalicí médium má olej nižší ochlazovací účinnost než voda, a proto nevznikají příliš velká pnutí a tím způsobené deformace.

Olej ochlazuje pomaleji v celém rozsahu teplot, i v oblasti perlitické přeměny, což může být někdy nevýhodné, a tak nachází své uplatnění u lomeného kalení, kalení legovaných ocelí s nižší kritickou rychlostí a kalení tenkostěnných nebo tvarově složitých výrobků. Při použití oleje dochází k jeho odpařování. Z tohoto důvodu je nutné zajistit relativní pohyb oleje vzhledem ke kalené součásti, například nucenou cirkulací lázně. V praxi je toto realizováno nejčastěji čerpadlem. Ochlazovací účinnost se u oleje posuzuje dle chemického složení, teploty vzplanutí a viskozity. Při nižších teplotách oleje, kdy je viskozita větší, se uplatňuje laminární odvod tepla z výrobku směrem k hladině, pod níž se vytváří tenká přehřátá vrstva (obr. 2.6). Tato vrstva může snadno vzplanout a tudíž je nepříznivá. Naopak snížíme-li viskozitu zahřátím oleje, dojde k rovnoměrnému rozptýlení tepla turbulentním prouděním oleje. Jelikož nedochází k vytvoření přehřáté vrstvy, je riziko vzplanutí velmi malé. Pro běžné kalení se používají oleje o pracovní teplotě 30 až 70 °C. Vznik přehřáté vrstvy může být také způsoben nedostatečným ponořením součásti do lázně. Zvýšením teploty oleje se prodlouží období existence parního polštáře, ale sníží se viskozita, usnadní cirkulace lázně a odvod

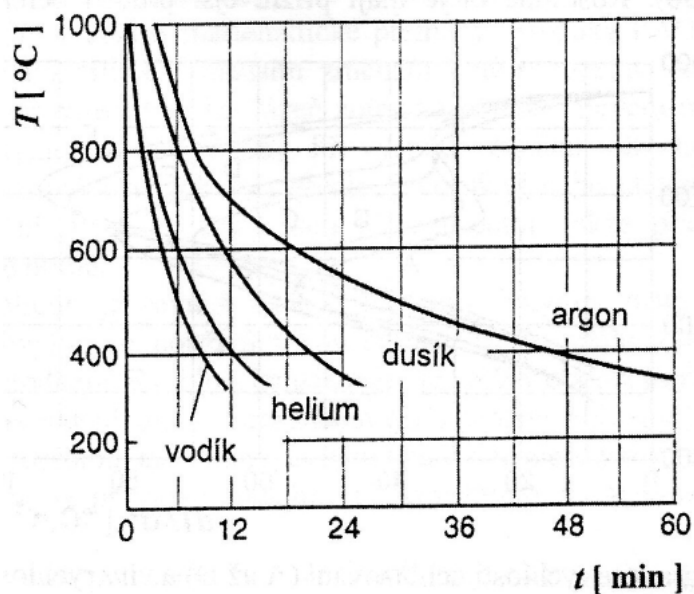
plynů. Oleje s teplotou vzplanutí nad 240 °C patří k nejkvalitnějším a pracují za teplot 120 až 200 °C. Tyto oleje se používají u termálního a lomeného kalení velkých výrobků. [1, 3, 13]



Obr. 2.6. Porovnání oleje s malou viskozitou (vlevo) a oleje s velkou viskozitou (vpravo) [13]

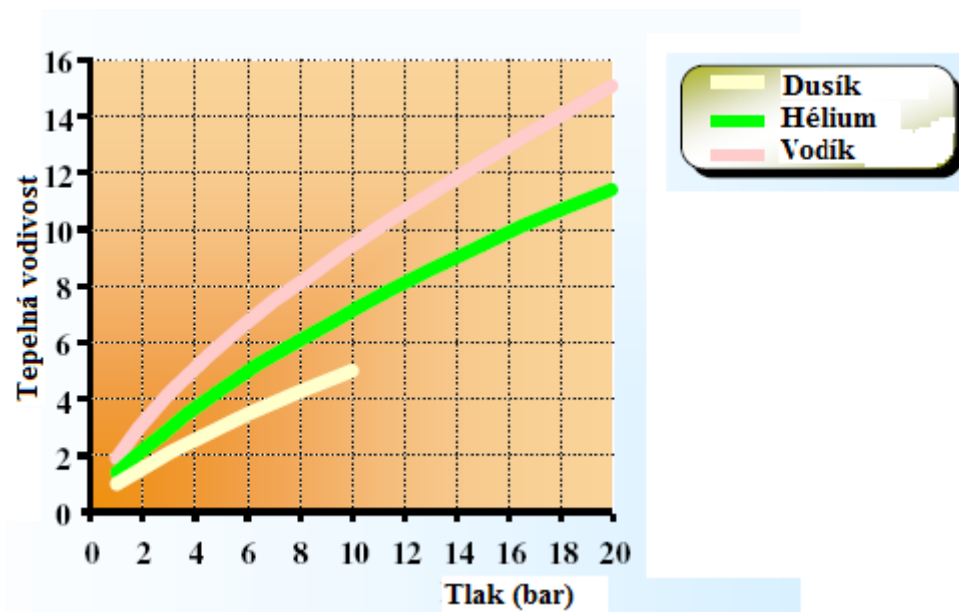
## Plyn

Jak je již uvedeno v odstavci 2.2.3., kalení v přetlaku plynu se většinou používá v kombinaci s nízkotlakou cementací. V podstatě se používají 4 základní typy chladících plynů: dusík ( $N_2$ ), vodík ( $H_2$ ), helium ( $He$ ) a argon ( $Ar$ ), přičemž argonu se používá zřídka kvůli jeho vysoké ceně a nejnižší ochlazovací schopnosti. Naopak nejrychleji se ochlazuje ve vodíku. Vodík má také nejnižší viskozitu z uvedených plynů, což klade menší požadavky na výkon čerpadla. Nevýhodou vodíku je jeho hořlavost. Proto se používá nejčastěji dusík nebo drahé helium. Rozdílné rychlosti ochlazování jednotlivých plynů jsou patrné z obr. 2.7. Na obr. 2.8 je znázorněna změna tepelné vodivosti jednotlivých plynů v závislosti na tlaku plynu. [1, 10]



Obr. 2.7. Srovnání ochlazovací schopnosti jednotlivých plynů [1]





Obr. 2.8. Závislost tepelné vodivosti jednotlivých plynů na tlaku [8]

#### 2.2.4. Vakuové kalení

Tento způsob kalení umožňuje dosáhnout kvalitního a čistého povrchu i při teplotách okolo 1000 °C. Není zde nebezpečí tvorby okují nebo oduhličení. Součásti ohřáté za sníženého tlaku (2 až 5 mbar) je možno ochladit v oleji nebo přetlakem plynu. Kalení do oleje se v dnešní době v souvislosti s vakuovým kalením již skoro nepoužívá, protože olej zanechával nečistoty v kalící komoře i na výrobcích a bylo nutné používat dvoukomorové kalící pece. V jedné komoře probíhal ohřev a ve druhé ochlazování v olejové lázni.

Při kalení v přetlaku plynu se používá jako plyn dusík, vodík, helium nebo argon o tlaku až 20 bar. Dále platí, že se zvyšujícím se tlakem roste tepelná vodivost plynu a tím i jeho ochlazovací schopnost (obr. 2.8). Tento proces lze snadno automatizovat a optimalizovat tak, aby ve výrobku vznikaly, pokud možno co nejmenší pnutí. Nevýhodou tohoto způsobu kalení je podstatně menší ochlazovací schopnost plynu oproti oleji. [9, 10, 14]

### 2.3. Popouštění

Popouštění je tepelné zpracování, které následuje po kalení, aby se ocel přiblížila rovnovážnému stavu. Při ohřevu se snižuje tvrdost a vnitřní pnutí, stabilizuje se struktura a získají se vhodné mechanické vlastnosti. Tento tepelný proces je nutné provést ihned po zakalení, aby nedošlo k popraskání součásti. Podle teplot, kterých pro ohřev použijeme, se popouštění nejčastěji rozděluje na nízkoteplotní a vysokoteplotní popouštění. Hranicí je teplota přibližně 300 °C. Ohřev se provádí maximálně do teploty  $A_1$ , kdy ještě nedochází k překrystalizaci.

Nízkoteplotní popouštění je vhodné pro součásti, u kterých je potřeba zachovat co největší tvrdost. Tvrdost se mírně sníží a současně se sníží i vnitřní pnutí a křehkost. Tento způsob popouštění se používá u součástí cementovaných a povrchově kalených.



Vysokoteplotní popouštění nám slouží k dosažení sorbitické struktury, což je jemně zrnitá směs feritu a cementitu. Uplatňuje se nejvíce jako přípravná operace před povrchovým kalením nebo pro vysoce namáhané součásti. Technologický postup kalení s následným vysokoteplotním popouštěním se nazývá zušlechťování. [3, 11]

Při popouštění ocelí s vyšším obsahem karbidotvorných prvků dochází při teplotách okolo 500 °C k nárůstu tvrdosti precipitací speciálních karbidů. Tento jev se nazývá sekundární tvrdost a je často vyšší než tvrdost získaná samotným kalením. Takto se zpracovávají oceli na výrobu náradí. Dalším jevem, který může při popouštění nastat, je tzv. popouštěcí křehkost. Podle teplot, za kterých může tato nežádoucí vlastnost nastat, rozlišujeme nízkoteplotní (cca 250 až 400 °C) a vysokoteplotní (cca 550 °C) popouštěcí křehkost. Nízkoteplotní popouštěcí křehkost je neodstranitelná, ale lze ji částečně omezit tepelně-mechanickým zpracováním. Vysokoteplotní popouštěcí křehkost lze odstranit opětovným tepelným zpracováním nebo též omezit tepelně-mechanickým zpracováním. Dále se rozlišuje izotermická a anizotermická popouštěcí křehkost. Izotermická vzniká při dlouhé výdrži na popouštěcí teplotě a může být nízkoteplotní i vysokoteplotní. Anizotermická popouštěcí křehkost nastává při pomalém ochlazování z vyšších teplot. Abychom zamezili jejímu vzniku, je třeba urychlit ochlazení při popouštění, a proto se nějaké druhy ocelí ochlazují do oleje nebo do vody. [1, 11]

## **2.4. Chemicko-tepelné zpracování**

### **2.4.1. Cementace**

Cementace je jednou z nejpoužívanějších metod chemicko-tepelného zpracování ocelí. Podstatou cementace je sycení povrchu oceli uhlíkem obsaženým v tuhém, kapalném nebo plynném prostředí při teplotě nad  $A_{c3}$ . Cílem cementace je obohacení povrchové vrstvy nízkouhlíkové oceli (0,1 až 0,3 % C) uhlíkem přibližně na 0,6 až 0,9 % C. Při vyšším obsahu uhlíku (nad 1 %) v cementované vrstvě se při ochlazování vylučuje po hranicích zrn karbidické sítové, které je nepříznivé z hlediska snížení houževnatosti oceli. S rostoucím obsahem uhlíku se také snižuje teplota  $M_f$ , což může mít za následek větší množství zbytkového austenitu v součásti po zakalení. Zbytkový austenit způsobuje nežádoucí snížení tvrdosti povrchové vrstvy. Obsah a rozložení uhlíku v cementované vrstvě závisí na výši cementační teploty, době výdrže na cementační teplotě, použitém cementačním prostředí a na chemickém složení cementované oceli, hlavně na obsahu uhlíku a karbidotvorných prvků. Nauhličená vrstva má tloušťku 0,5 až 1,5 mm. Vzniklá povrchová vrstva se po zakalení oceli vyznačuje zvýšenou tvrdostí, odolností proti otěru a také vysokou odolností proti únavě součásti. Samotné jádro součásti se přitom nezakalí vůbec nebo jen z části. Zda-li se jádro zakalí či nikoliv je závislé na průřezu součásti, způsobu kalení a prokalitelnosti oceli. Pokud se použijí vhodné podmínky pro zakalení jádra, má vzniklý martenzit malou tvrdost, což je dáno nízkým obsahem uhlíku v jádře. Proto jádro zůstane měkké a houževnaté.

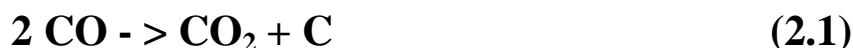
Z důvodu, že se ve feritu rozpouští pouze malé množství uhlíku, musí se cementace provádět v oblasti austenitu při teplotách 850 až 950 °C, kde je rozpustnost uhlíku větší. Teploty jsou různé podle druhu cementační oceli a cementačního prostředí. Pro cementování jsou vhodné uhlíkové oceli třídy 12 nebo legované konstrukční oceli třídy 14 a 16. Výjimečně

lze cementaci provádět až při teplotách 1150 °C, což je vhodné pouze pro jemnozrnné cementační oceli (Cr-Mn-Ti) odolné proti hrubnutí austenitického zrna. Tyto oceli je možno dlouhodobě cementovat při teplotách nad 1000 °C, tzv. rychlocementace. Zvyšováním teploty roste difuzivita uhlíku v austenitu a tím se cementace urychluje a hloubka nauhličené vrstvy roste. Od určité teploty a při stejném průtočném množství cementační atmosféry nastává pokles cementačního potenciálu. To je při zvětšené hloubce cementační vrstvy výhodné, protože se zmenšuje i gradient koncentrace uhlíku v součásti a s tím spojená vnitřní napětí. Cementační potenciál se však v praxi nesnižuje zvýšením teploty, ale řízením cementačního potenciálu. Z tohoto důvodu mají průběžné pece dvě pásma, kde se při konstantní teplotě nejdříve v prvním sytícím pásmu použije vyššího nauhličujícího potenciálu a poté následuje pásmo difuzní, kdy je potenciál záměrně snížen. Difuzní stadium zahrnuje asi 25 % z celkové doby působení atmosféry. V tomto stadiu dochází jak k částečnému oduhličení povrchu, tak i k difuzi uhlíku do jádra součásti.

Doba cementace se odvíjí dle toho, jaké vlastnosti součásti požadujeme, např. na požadované hloubce nauhličené vrstvy nebo velikosti tlakového namáhání. Tenké cementační vrstvy do 0,5 mm se používají u malých výrobků nebo při namáhání menšími měrnými tlaky. Naopak tlusté cementační vrstvy nad 1,5 mm se volí pro velké výrobky nebo pro namáhání většími měrnými tlaky. [1, 3]

Aby vůbec došlo k adsorpci uhlíku do povrchu oceli, je nutné získat uhlík v atomárním stavu, a to buď v tuhém, kapalném nebo plynném prostředí. Tuhé prostředí je ve formě prášku, jako kapalně prostředí se používá solná lázeň. Nejpoužívanějším prostředím v současné výrobě pro větší série je plyn.

Cementace v tuhém prostředí, tedy v prášku, patří mezi nejstarší způsoby sycení povrchu oceli uhlíkem. Využívá se směsi dřevěného uhlí s uhličitánem barnatým (7 až 20 %). Čím více obsahu uhličitánu barnatého, tím je rychlejší nauhličování, ale je zde nebezpečí příliš velkého obsahu uhlíku v povrchové vrstvě. Jak bude cementace probíhat je určeno i zrnitostí dřevěného uhlí. Zde je nutné zvolit optimální zrnitost, protože příliš velké kusy mají relativně malou plochu styku s materiálem, a tím brzdí průběh cementace. Naproti tomu velmi jemné prášky způsobují též zpomalení. Dlouholetými zkušenostmi a praxí byla stanovena ideální zrnitost cca 5 mm. Při cementování v prášku je nejdříve nutno všechny součásti určené k cementaci důkladně odmastit. Poté se vloží do krabice, která je ze žáruvzdorného plechu (může být i z nízkouhlíkového). Je potřeba předměty rozmístit tak, aby byly pokud možno co nejstejněměrněji obklopeny cementačním práškem. Krabice se uzavře, utěsní jílem a vloží do lehce vyhřáté pece (komorové, šachtové). Zde probíhá postupný ohřev na cementační teplotu. Difúze uhlíku do oceli probíhá od povrchu směrem k jádru. To se uskutečňuje podle rovnice:



Z praktických zkušeností je nejideálnější, když má povrch součásti mírně nadeutektoidní složení a množství uhlíku se směrem do jádra plynule snižuje.

Uhličitán barnatý působí jako náhražka vzduchu, který nemá přístup k prášku. Přístup vzduchu by zaručoval spalování uhlíku na oxid uhličitý a ten by následně při styku se žhavím

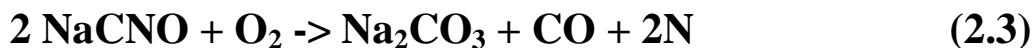
uhlím redukoval na oxid uhelnatý. Tento postup by znamenal trvalou ztrátu uhlí, proto se používá uhličitán barnatý a rozklad je popsán rovnicí:



Cementační schopnost prostředí se neustále obnovuje a dochází i k regeneraci uhličitánu barnatého.

Cementování v prášku se v dnešní době již téměř nepoužívá z důvodu malé produktivity, prašnosti okolí a z důvodu nerovnoměrně nauhličené vrstvy. Je nahrazeno cementováním v lázni nebo častěji v plynu.

Cementace v lázni probíhá v lázních roztavených solí, které slouží jako zdroj uhlíku. Používají se kyanidové lázně (NaCN, KCN). K úpravě viskozity lázně se přidávají chloridy (NaCl, KCl, BaCl). Reakce kyslíku s kyanidy způsobí vznik kyanatanů, které přicházejí do styku s kovem jako katalyzátorem. Kyanatany se rozkládají podle rovnice:



Lázeň při cementaci ubývá a je nutné ji stále doplňovat. Vzniklý dusík z rovnice 2.3 nedifunduje do povrchu oceli z důvodu vysoké teploty.

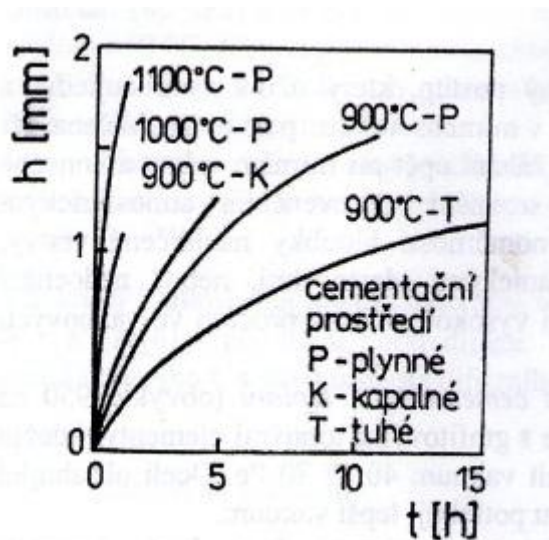
Velká nevýhoda cementačních lázní je, že jsou vysoce jedovaté. V dnešní době je snaha nahrazovat tyto lázně lázněmi na bázi  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a SiC. Obecně se lázně používají spíše pro součásti menších rozměrů a u součástí, kde požadujeme menší hloubku nauhličení.

Plyn jako cementační médium se jeví jako nejpříjemnější varianta pro větší sériovost výroby. Tento druh cementace je výhodný i z technologického hlediska. Atomární uhlík se získává disociací z oxidu uhelnatého nebo uhlovodíku. Uhlovodíky jsou vyjádřeny vzorcem  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ . Rozklad uhlovodíku lze popsat rovnicí:



Při cementaci v plynu je možno vlastnosti prostředí přesně řídit a kontrolovat, čehož se s výhodou využívá při rychlých změnách požadavků výroby. Takto lze pro konkrétní součást s požadovanými vlastnostmi vytvořit vhodné cementační prostředí. Cementační plyny je dále nutné ještě karburovat, což se týká především koksárenského plynu a svítiplynu. Jedním z nejpoužívanějších cementačních plynů je tzv. teral (terpentýn, alkohol, aceton) a to většinou pro šachtové pece Monocarb. V dnešní době se stále více uplatňuje cementace v průběžných pecích.

Celková doba cementování se odvíjí od požadované hloubky nauhličené vrstvy (obr. 2.9). Obecně platí, že čím je doba delší, tak je i hloubka vrstvy větší. Závislost hloubky nauhličení na teplotě však není lineární, ale parabolická, což je reprezentováno z počátku rychlejším sycením povrchu uhlíkem a ve větších vzdálenostech od povrchu rychlost nauhličení plynule klesá. Obvykle platí, že čím většími měrnými tlaky je součást namáhána, tím větší se volí cementační vrstva.



Obr. 2.9. Časová a teplotní závislost hloubky cementační vrstvy oceli v různém aktivním prostředí [1]

Z uvedených poznatků je patrné, že k dosažení požadované hloubky nauhličení v lázni nám stačí podstatně kratší časy, než je tomu u cementace v prášku. Tento rozdíl je někdy až v řádu několika hodin. Cementace v plynu je kompromisem mezi lázní a práškem s mnoha dalšími výhodami.

Požadavek výroby je někdy takový, že není požadováno nauhličení (zakalení) všech částí součásti. Ochranu pře nauhličením lze provést několika způsoby. Na povrch, který je potřeba chránit, jsou nanášeny buď různé pasty, nátěry nebo povlaky neželezných kovů. Hlavně pro cementaci v lázni se používá nejúčinnější ochrany přídavku na obrábění, kde ostatní metody neposkytují dostatečnou ochranu povrchu.

Povrch oceli nasycený uhlíkem k zajištění požadované zvýšené tvrdosti povrchu nestačí. K tomu, abychom dosáhli zvýšené tvrdosti, je třeba součást ještě zakalit (dosáhnout nerovnovážné struktury) a popustit za nízkých teplot. Existuje několik způsobů kalení po cementaci. Nejjednodušším způsobem je přímé kalení z cementační teploty. Tento způsob se používá jen pro méně namáhané součásti a kalení v lázni, protože kalicí teploty jsou příliš vysoké a tak vznikají velká pnutí a hrozí, že součást popraská. Proto se také používá další způsob kalení s přichlazením (tzv. kalení na povrch) kdy se součást ochladí na kalicí teplotu nauhličené vrstvy a z této teploty se provede zakalení. Tohoto způsobu se používá nejčastěji při cementování v plynu. Někdy lze při ochlazování klesnout pod teplotu  $A_{r1}$ , kdy se dosáhne zjemnění zrna v jádru a k zajištění správné kalicí teploty se provede ohřev nad  $A_{C1}$  a poté se zakalí. Nebo se součást nechá ochladit volně na vzduchu a následně se ohřeje nad teplotu  $A_{C1}$ . Tento způsob se může zdát někdy nevýhodný v důsledku podkalení jádra, a proto se také vysoce zatěžované součásti kalí po cementování dvakrát tzv. na jádro a na povrch. Prvním krokem je kalení „na jádro“ a poté následuje kalení „na povrch“. Při druhém ohřevu dochází k vysokoteplotnímu popuštění (zušlechtění) jádra, které je již zakaleno. Poté následuje popuštění povrchu nejčastěji do 180 °C. [1, 2, 6]

## 2.4.2. Vakuová cementace

Jedná se o nový způsob tepelného zpracování, který je uplatňován stále častěji. Výrobky zpracované touto metodou nepodléhají oxidaci na hranicích austenitických zrn (lepší mechanické vlastnosti) a jsou lesklé, bez okují. Lze také dosáhnout poměrně rovnoměrné hloubky nauhličené vrstvy v závislosti na použitém cementačním plynu. Vakuové cementování je relativně nenákladný proces, co se provozu týče. To se bohužel nedá říci o pořizovacích nákladech na zařízení a s tím spojených různých opatření. Z ekologického hlediska je cementace ve vakuu velmi výhodná, jelikož neexistuje téměř žádný odpad.

Používá se vakua 10 až 70 Pa, přičemž velikost vakua je závislá na topných elementech pece a druhu cementovaného materiálu. Pro pece s topnými elementy z SiC se používá vakuum 40 až 70 Pa, ale pece s grafitovými topnými elementy musí mít nižší tlak. Totéž platí i pro oceli s vysokým obsahem chromu a křemíku z důvodu vysoké afinity ke kyslíku. Protože ve vakuu je značný přenos tepla sáláním až při teplotách nad 600 °C, uplatňuje se vakuové tepelné zpracování až od těchto teplot. Pro tepelné zpracování za nižších teplot se volí pece, které používají ochranné atmosféry plynů.

Samotný proces nauhličování povrchu oceli se skládá ze dvou hlavních stádií. V prvním stádiu je povrch oceli nauhličen při parciálním tlaku uhlovodíku, poté se ve druhém stádiu nechá uhlovodík difundovat do oceli (někdy se tento postup i několikrát opakuje). Následně je součást zakalena v plynu nebo méně častěji v oleji (silikonový olej).

Celý proces lze shrnout do 4 kroků:

- 1) Nejprve se musí provést austenitizace na cementační teplotu, která se obvykle pohybuje okolo 950 až 1050 °C.
- 2) Dále následuje nauhličování, při kterém se sytí austenit uhlíkem až do mezní hodnoty dané segregační čarou při konkrétní teplotě. Sytí se buď čistým uhlovodíkem nebo směsí uhlovodíku a inertního plynu. Za čistý uhlovodík lze nejčastěji považovat metan -  $\text{CH}_4$  nebo propan -  $\text{C}_3\text{H}_8$ . Jako inertní plyn se používá obvykle dusík. Uhlík disociuje na povrchu oceli, kde je přímo absorbován austenitem. Při této reakci se uvolňuje plynný vodík podle rovnice 2.4. Těchto reakcí by se dalo použít k řízení cementačního potenciálu, ale protože je obtížné měřit přímo rozklad uhlovodíku s určitou přesností, tak se to v praxi nepoužívá. Pro rychlé nauhličení je potřeba dosáhnout určitého minimálního parciálního tlaku uhlovodíku. Při překročení této hodnoty tlaku už cementační potenciál nezávisí na tlaku uhlovodíku. Obvykle je tlak v peci s keramickými elementy 15 až 25 kPa, v peci s grafitem 1 až 7 kPa. Při tlaku větším než 40 kPa je nebezpečí sazení.
- 3) Difuzní stádium zmenšuje koncentrační spád uhlíku na povrchu oceli. To probíhá při stejné teplotě, při které probíhalo nauhličení a při mírném vakuu okolo 100 Pa.
- 4) Na závěr vakuové cementace je nutné součást tepelně zpracovat. Po vakuovém cementování nejčastěji následuje zrychlený přechod mezi teplotami  $A_{F3}$  a  $A_{F1}$  z důvodu vysokých cementačních teplot, při kterých hrubne zrna. Tímto zrychleným přechodem se zrna zjemní. Kalení po vakuovém cementování je obvykle prováděno v přetlaku plynu, nejčastěji dusíku nebo hélia. Je možno součást ochladit i v oleji za přítomnosti dusíku. Druhý způsob se v současné době již skoro nepoužívá, protože docházelo ke znečišťování

pracovní komory a tak bylo zapotřebí používat 2 komory, jednu pro ohřev a druhou pro samotné zakalení součástí.

Obecně je vakuové cementování difuzní izotermický děj. Platí zde časový parabolický zákon difúze:

$$h = k_h \cdot t^{1/2} \quad (2.5)$$

$h$ ... hloubka cementační vrstvy [mm]

$k_h$ ... koeficient související s výpočtem  $h$  [ $\text{mm} \cdot \text{h}^{1/2}$ ]

$t$ ... celková doba difúze [h]

Celková doba difúze má složku nauhličovací  $t_C$  a složku difuzní  $t_D$ . Poté tedy dostáváme vzorec:

$$t = t_C + t_D \quad (2.6)$$

A složka nauhličovací  $t_C$  je dána vztahem:

$$t_C = k_C \cdot t \quad (2.7)$$

$k_C$ ... koeficient vyjadřující podíl nauhličovacího stadia

Jednou z nejpoužívanějších metod vakuového cementování je pulzně evakuační metoda. Tato metoda je založena na principu střídání přívodu plynu do pece s následným odčerpáním, kdy už není dostatečně vysoká nauhličující kapacita plynu. Přednostmi této metody je možnost získat poměrně rovnoměrné hloubky cementační vrstvy, což je dáno rovnoměrnou cirkulací uhlovodíku v prostoru pece, dále tato metoda minimalizuje spotřebu cementačního plynu, a tím lze dosáhnout značných úspor. [1, 4, 5, 8, 10, 13]

### 2.4.3. Nitrocementace

Jedná se o metodu, při které se uplatňuje sycení povrchu oceli uhlíkem s přídavkem dusíku. Provádí se při teplotách blíže samotné cementaci. Pokud bychom sytili povrch dusíkem s přídavkem uhlíku, jednalo by se o karbonitridování. Obecně jsou uhlík i dusík austenitotvornými prvky, a tak snižují teplotu  $A_{C3}$ .

Proces nitrocementace má mnoho společných znaků se samotnou cementací. Jedním z nejdůležitějších je, že se vždy po nitrocementaci musí ještě součást zakalit, abychom dosáhli martenzitické struktury a požadovaných mechanických vlastností.

Nitrocementaci lze provádět v kyanidových lázních kolem teplot 800 až 850 °C nebo v plynné cementační atmosféře s přídavkem čpavku při teplotách 820 až 860 °C. Při nitrocementování v lázni se též můžeme setkat s ekvivalentním pojmem tzv. kyanování.

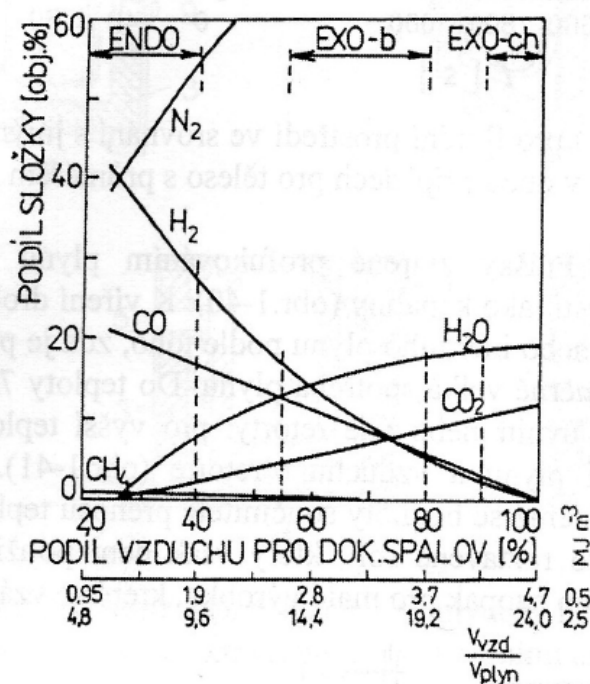
Při nitrocementaci lze i uhlíkové oceli kalit do oleje, protože dusík zvětšuje prokalitelnost povrchové vrstvy. Tímto postupem se dosáhne menších pnutí a s tím i související menší deformace. Na druhou stranu dusík zvyšuje obsah zbytkového austenitu v povrchové vrstvě. To má za následek snížení tvrdosti a odolnosti proti opotřebení a naopak zvýšení únavové pevnosti a celkové houževnatosti součástí. Pevnost jádra součástí dosahuje až 1700 MPa. Po kalení se součásti popouštějí, podobně jak tomu bylo u cementování, za nízkých teplot. Pokud je požadována odolnost součástí proti zadírání, jako tomu je např. při suchém tření, provádí se nitrocementace v plynu s čpavkem (50 %) a propanem (50 %) po dobu několika hodin při teplotách 660 až 790 °C. Tímto postupem lze dosáhnout srovnatelných výsledků se sulfonitridováním.

Dosahovaná hloubka nitrocementované vrstvy se pohybuje obvykle v rozmezí 0,2÷0,4 mm. Nitrocementace je vhodná pro oceli s vyšším obsahem uhlíku (až 0,4 %) než u ocelí určených k cementování a pro drobné součásti jako jsou hřídele, pastorky, ozubená kola. Konečná vrstva má vysokou tvrdost, odolnost proti únavě (v některých případech) a opotřebení. V důsledku menších tloušťek vrstev a nižších teplot jsou rovnoměrněji rozložena napětí 1. druhu, což nezpůsobuje tak velké deformace součástí při porovnání s cementací.

Nitrocementace je technologicky velice náročná, protože je potřeba zaručit neustálou regulaci cementačního a nitridačního potenciálu v určitém rozmezí hodnot. [1, 2]

#### **2.4.4. Ochranná prostředí**

Při ohřevu výrobků je stále větší snahou zabránit oduhličení a oxidaci. Při použití ochranných atmosfér je tento požadavek splněn a povrch součástí zůstává hladký a lesklý. Mezi nejpoužívanější druhy ochranných atmosfér patří exo-atmosféry, endo-atmosféry (bohaté, chudé) a vakuum. Exo-atmosféry (zejména chudé exo-atmosféry) lze použít pro nízkouhlíkové oceli, neboť mají vysokou tendenci oduhličovat, což je způsobeno vysokým poměrem  $\text{CO}_2/\text{CO}$  (obr. 2.10). Pro oceli s vyšším obsahem uhlíku se uplatňují endo-atmosféry. Vakuum má řadu výhod, ale jeho účinnost se projevuje až při vyšších teplotách. [1]



Obr. 2.10. Chemické složení primárních exo-atmosfér a endo-atmosfér [1]

## Endo-atmosféra

Ochranná atmosféra vyráběna nedokonalým spalováním uhlovodíku se vzduchem. Nejčastěji se používají uhlovodíky propan nebo butan. Reakce uhlovodíku se vzduchem je endotermická, protože je potřeba 25 až 40 % teoretické hodnoty vzduchu nutné pro dokonalé spalování. Tato skutečnost vyžaduje použití katalyzátoru a to i přesto, že teplota v retortě přesahuje 1000 °C. Celý proces musí být řízen tak, aby obsah vodní páry a CO<sub>2</sub> byl velmi nízký (asi 0,2 % CO<sub>2</sub>). Dále je atmosféra tvořena přibližně 30 až 45 % H<sub>2</sub>, 35 až 50 % N<sub>2</sub>, 20 % CO a 1 % uhlovodíku. Endo-atmosféry mají své uplatnění při kalení, cementaci i nitrocementaci. Je nutno dodržovat určitá pravidla, protože tyto atmosféry jsou jedovaté a výbušné. Zavádějí se do pece až při teplotách nad 750 °C, po evakuaci kyslíku se proplachují inertním plynem, nejčastěji N<sub>2</sub> a také lze snižovat v průběhu procesu jejich nauhličující potenciál. [1]

## Vakuum

Jedná se o velmi účinné a produktivní ochranné prostředí vyžadující vysokou čistotu provozu, kde vlastní proces probíhá za sníženého tlaku. Povrch součástí zůstává lesklý bez větších známek oxidace. Ve vakuu je možný přenos tepla pouze zářením, což je nevýhodné při nižších teplotách, kdy je podíl záření velice malý. Proto vakuum jako ochranné prostředí nachází své uplatnění zejména při vyšších teplotách, tj. nad 600 °C. Pro teploty nižší je vhodné použít některé z ochranných atmosfér plynů. Vakuum je z větší míry tvořeno vodní párou a různými organickými látkami. Výhodou je odpařování plynů z povrchu ocelí, ale při určitém tlaku dochází i k odpaření některých kovů. Proto je nutné zvolit vhodně teplotu a tlak,



aby nedocházelo k odpařování popř. napařování některých prvků. Například u vysokolegovaných slitin může za vysokých teplot dojít k odpaření chromu.

Vakuum je z hlediska ekologie velice přijatelné řešení. Malými ztrátami tepla (přenos pouze zářením) se dosahuje i nízkých provozních nákladů. Obrovským přínosem je možnost vysokého stupně automatizace v procesech tepelného zpracování. [1, 10]

Vakuum nachází své uplatnění u tepelného i chemicko-tepelného zpracování. Nejběžněji lze ve vakuu kalit a popouštět, žíhat, cementovat, vytvářet povlaky (PVD) atd. [4]

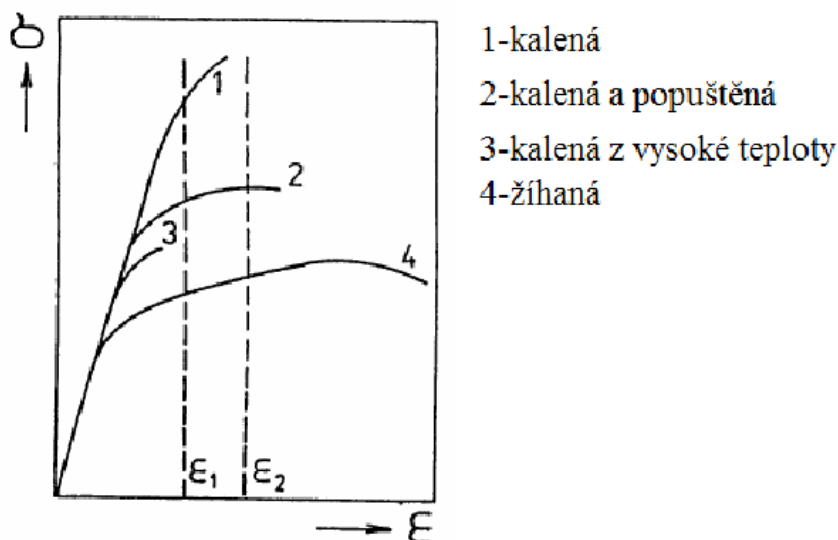
## 2.5. Napětí v materiálu a deformace

S pnutím vznikajícím v materiálu je nutno počítat již od samotného začátku výroby, tj. při návrhu součásti. Úroveň vnitřních pnutí je úzce spojena s deformacemi součásti, a proto je třeba se jimi zabývat. Z hlediska výroby součástí a následného tepelného zpracování mohou probíhat deformace součástí rozměrové i tvarové. Rozměrové změny jsou oproti tvarovým z praktického hlediska výhodnější a nepřinášejí větší problémy při jejich odstraňování nebo při zamezení jejich vzniku, pohybují-li se tyto změny v dostatečně úzkém intervalu hodnot. Nejčastěji jim lze předcházet korekcí předchozího mechanického opracování. Obecně deformace součástí nezáleží jen na tepelném zpracování, ale též na stavu výchozího materiálu (homogenita, rozložení velikosti zrn, prokalitelnost), šaržování, konstrukci dílu a jeho výrobě.

Někdy vznikají v materiálu tak velká vnitřní napětí, že může dojít ke vzniku mikrotrhlin popř. až k porušení součásti. Z tohoto hlediska je nutné pnutí co nejvíce eliminovat a to zejména u součástí, kde by mohla nepředvídaná porucha součásti vést k havárii zařízení.

Podle charakteru působení lze pnutí rozdělit na dočasná, jejichž příčinou jsou nejčastěji rozdíly teplot povrchu a vnitřních částí součásti (jsou přítomna dokud trvá příčina, jež je vyvolala) a zbytková, která přetrvávají v součásti i po odstranění vnějšího činitele (mechanické nebo jiné povahy). Zbytková pnutí v součásti přetrvávají, i když už na součást nepůsobí žádné vnější zatížení a teplota celé součásti je stejná. Společným znakem všech napětí je Hookeův zákon (2.8), ze kterého plyne, že napětí vznikající v materiálu jsou závislá na pružné deformaci popř. na modulu pružnosti daného materiálu. Tento zákon je platný pouze do meze úměrnosti daného materiálu.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.8)$$



Obr. 2.11. Deformační závislosti oceli v závislosti na tepelném zpracování [1]

Z obr. 2.11 je patrný vliv způsobu tepelného zpracování na úroveň vnitřních napětí při vyvolané deformaci. Například pokud dosáhneme deformace  $\epsilon_2$ , tak u kalené oceli a u oceli přehřáté (kalená z vysoké teploty) dojde k lomu. Naopak při téže deformaci u oceli popuštěné nebo žíhané k lomu nedojde.

Vnitřní napětí v materiálu se nejčastěji rozlišují dle velikosti objemu součásti, ve kterém působí, na makroskopická, mikroskopická a submikroskopická. Tato napětí se vzájemně ovlivňují a v praxi ještě obvykle superponují ve výsledné vnitřní napětí. Nadměrný výskyt napětích působících v menším objemu může vést ke vzniku napětí týkajících se větších objemů.

#### Rozdělení vnitřních napětí:

##### **Makroskopická napětí (napětí I. druhu)**

Tato napětí se týkají celého objemu součásti a jsou spojena s geometrií součásti a se způsobem předchozího zpracování jako je hrubování nevyžíhané součásti nebo kalení. Jejich příčinou jsou rozdíly teplot na povrchu a v jádře výrobku. U kalení závisí jejich velikost na tvaru součásti a na způsobu ponořování součásti do kalící lázně.

##### **Mikroskopická napětí (napětí II. druhu)**

Označovány též jako homogenní mikroskopická napětí. Zasahují oblast velikosti zrna a v některých případech i oblast několika subzrn a nejsou spojena s geometrií součásti. Příčinou těchto napětí je nerovnoměrná přeměna jedné fáze v druhou a rozdílné délkové roztažnosti jednotlivých fází. Pro porovnání je délková roztažnost austenitu přibližně dvakrát větší než délková roztažnost martenzitu.

## Submikroskopická napětí (napětí III. druhu)

Vyskytují se v objemu několika desetin nanometrů a maximálně do velikosti parametru mřížky. Ani tato napětí nejsou závislá na geometrii součásti. Patří sem bodové poruchy krystalické mřížky a v některých případech mohou být spojena i s hranovými dislokacemi. [1]

## 2.6. Zkoušky tvrdosti

Tyto mechanické zkoušky jsou normalizované a mají v technické praxi velké uplatnění, zejména z důvodu jejich snadné aplikovatelnosti v porovnání s jinými druhy zkoušek mechanických vlastností materiálu.

Zkoušky tvrdosti lze rozdělit dle charakteru způsobu vytvoření vtisku na vrypové (Martens), vnikací (Brinell, Vickers, Rockwell,) a odrazové (Shore). Z hlediska působení zátěžné síly na statické a dynamické. Vrypové zkoušky se již v dnešní době téměř nepoužívají. Pro plastické interakce materiálu s vnikacím tělesem je používán termín vnikací zkoušky. Odrazové zkoušky jsou založeny na principu elastické interakce materiálu s vnikacím tělesem a používají se pro plasty a pryže.

Z naměřené tvrdosti lze také zjistit pevnost konkrétního materiálu. Nejpoužívanější v oblasti kovových materiálů jsou vnikací zkoušky tvrdosti. Tvrdost je definována jako odpor, který klade zkoušený materiál proti vnikání cizího tělesa, tzv. indentoru. Podstatou je změření velikosti vtisku, který vznikne po zatlačení zkušebního tělíska do materiálu. Zkušebním tělískem může být kulička, jehlan nebo kužel. Dle toho poté změříme průměr, úhlopříčku nebo hloubku vtisku. Každá z uvedených zkoušek má své opodstatnění pro různé druhy materiálů (ocelí).

Zkouška tvrdosti podle Brinella (kulička) je vhodná zejména pro měkké materiály a pro materiály s heterogenní strukturou (litiny).

Nejuniverzálnější je zkouška tvrdosti podle Vickerse (jehlan), která je použitelná pro širokou skupinu materiálů.

Pro kalené a velmi tvrdé materiály se používá zkouška tvrdosti podle Rockwella (kulička nebo kužel), která je ve používání především v USA, kde také vznikla. Tato zkouška je též vhodná svým principem pro součásti s okujeným povrchem. [3, 7]

### 2.6.1. Vickersova zkouška tvrdosti

Jak již bylo zmíněno, jedná se o velice rozšířenou zkoušku tvrdosti. Podle charakteru působení síly se jedná o statickou zkoušku. Princip této zkoušky spočívá v zatlačování vybroušeného čtyřbokého jehlanu z diamantu o vrcholovém úhlu  $136^\circ$  do zkoušeného materiálu a změření úhlopříček vzniklého vtisku (obr. 2.12). Tvrdost podle Vickerse se označuje zkratkou HV (Vickers hardness number) a je to normou definovaný vztah jako poměr zatěžující síly k ploše vtisku:

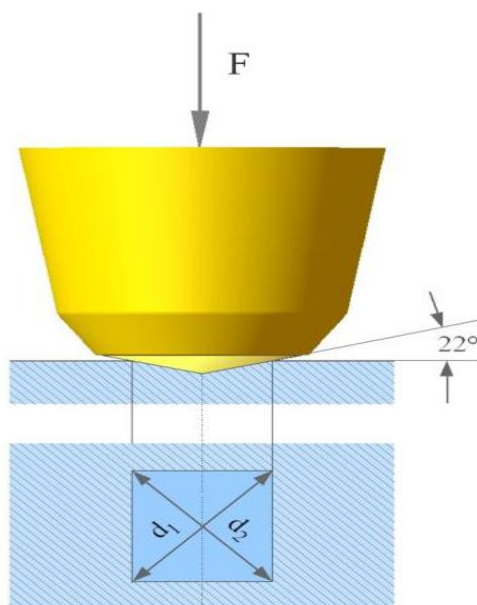
$$HV = 1,854 F/d^2 \text{ [kp/mm}^2\text{]} \quad (2.9)$$

F... zatěžující síla v kp (1 kp = 9,81 N)

d... aritmetický průměr naměřených úhlopříček  $d_1$  a  $d_2$  v mm

Existují srovnávací tabulky, kde podle  $d$  a velikosti zatížení lze přímo dohledat hodnoty tvrdosti HV.

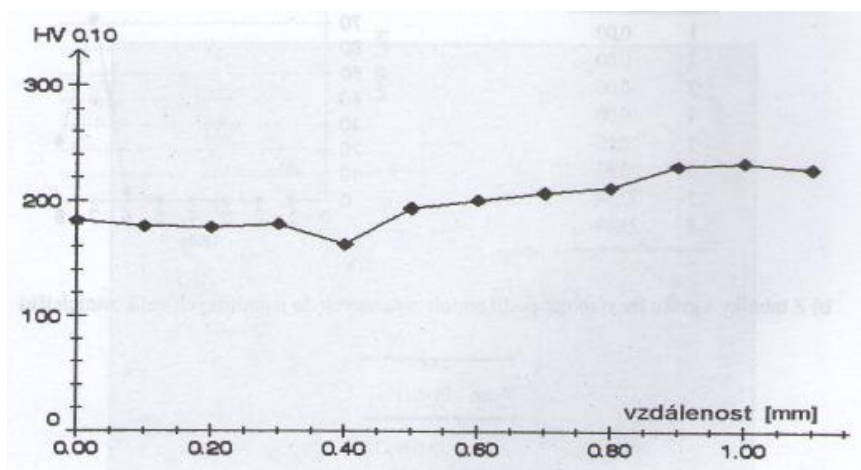
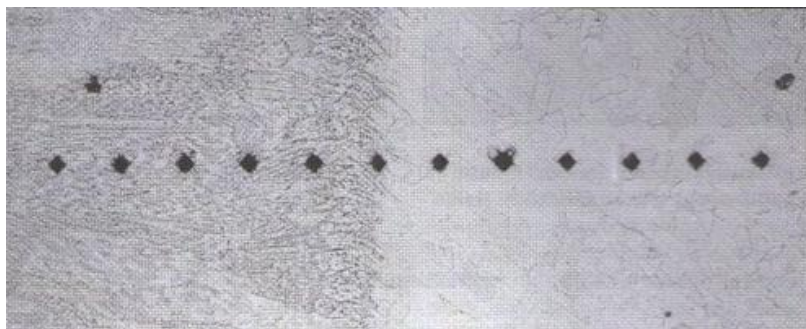
Obrovská výhoda této zkoušky plyne z používaného indentoru, kde lze použít široké rozpětí zatěžujících sil, aniž by se vtisky od sebe výrazně geometricky lišily. Výsledná hodnota tedy není závislá na podmínkách zkoušky. [3, 7]



Obr. 2.12. Schéma Vickersovy zkoušky tvrdosti [12]

### 2.6.2. Zkouška mikrotvrdosti

V praxi často nastávají případy, kdy chceme zjistit tvrdost jednotlivých strukturních fází, rozložení difuzních vrstev, hloubku vrstev povrchových úprav nebo jen změřit tvrdost velmi tenkých předmětů. V takovém případě se provádějí zkoušky pod malým zatížením s rozsahem hodnot od 2 gramů do 10 kilogramů. V takovýchto případech pak mluvíme o měření mikrotvrdosti. Nezávislost Vickersovy zkoušky na velikosti zatížení činí tuto zkoušku vhodnou pro měření mikrotvrdosti. Přístroje pro měření mikrotvrdosti, tzv. mikrotvrdoměry, jsou vyráběny jako samostatné přístroje nebo jsou doplňkem metalografických mikroskopů. Samotné měření je vyhodnocováno pomocí počítače, na kterém lze naprogramovat velikost zatížení i vzdálenosti jednotlivých vtisků. Jedná se tedy o automatizovaný proces. Zobrazení vtisků a průběh tvrdosti v určité vzdálenosti na měřené součásti lze pozorovat na monitoru počítače ve zvoleném měřítku (obr. 2.13). [7]

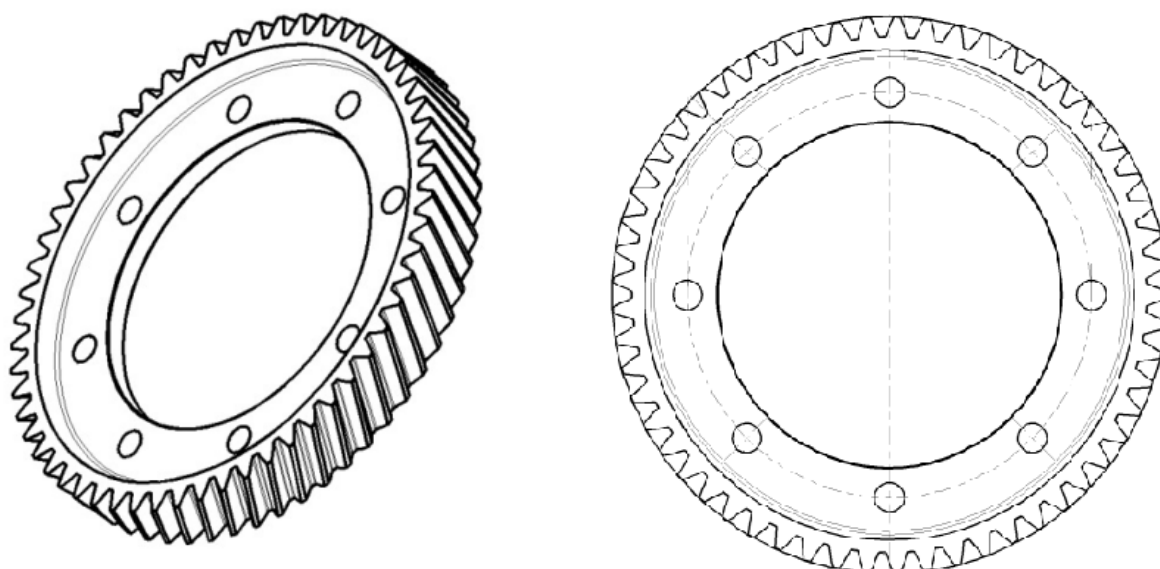


Obr. 2.13. Automatické měření mikrotvrdosti a graf průběhu tvrdosti [7]



Prvek Vzorek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Al	Ti	Ni	Mo	O <sub>2</sub>	N
Předpis	0,15 ÷ 0,23	0,50 ÷ 0,80	≤ 0,12	≤ 0,035	0,025 ÷ 0,035	0,65 ÷ 0,85	0,015 ÷ 0,040	≤ 0,005	1,50 ÷ 1,90	0,28 ÷ 0,38	≤ 0,0025	≤ 0,015
Naměřeno	0,21	0,80	0,11	0,012	0,035	0,70	0,017	0,002	1,58	0,308	0,0015	0,0065

Tab. 3.1. Chemické složení oceli TL 4521 [9]



Obr. 3.2. 3D pohled (vlevo) a čelní pohled (vpravo) na ozubené kolo [9]

### 3.2. Zařízení pro tepelné zpracování

Hnaná kola rozvodovky byla zpracovávána dvěma způsoby tepelného zpracování. Jednalo se o atmosférickou cementaci s kalením v oleji a vakuovou cementaci s kalením v přetlaku plynu.

#### 3.2.1. Zařízení pro atmosférickou cementaci a kalení v oleji

Atmosférická cementace byla prováděna ve dvoukomorové vsázkové peci firmy Aichelin (obr. 3.3), kde po ukončení samotného nauhličování probíhá zároveň kalení do vířivé olejové lázně o teplotě 60 °C. Následuje praní v pračce Aichelin za teploty 60 °C/20min a popouštění v popouštěcí peci Aichelin na teplotu 170 °C/2hod. Cementace probíhá za teploty 920 °C a před kalení je tato teplota snížena na 810 °C po dobu jedné hodiny. Tento proces je optimalizován ve firmě Škoda-Auto již několik let.

Při cementaci bylo použito endo-termického ohřevu s podporou metanu a čpavku. Průtok metanu se řídí dle uhlíkového potenciálu, který je při nauhličování 1,05 % C a poté je záměrně snížen na 0,75 % C, čímž se dosáhne snížení koncentračního gradientu uhlíku a rovnoměrnějšího průběhu tvrdosti.

Při kalení je zajišťována cirkulace kalící lázně dvěma čerpadly a používá se kalící ložiskový olej TK46. [9, 15, 16]



Obr. 3.3. Vsázková pec firmy Aichelin [9]

### 3.2.2. Zařízení pro vakuovou cementaci a kalení v přetlaku plynu

Pro nízkotlakou cementaci bylo použito nové zařízení od firmy ALD Technologies. Nejprve se kusy zbavují nečistot v pračce a poté se v předehřívací peci (tzv. oxidační pec) celá vsázka ohřeje na teplotu 370 °C a následuje přepravení do kalícího/transportního modulu, který vsázku zaveze do cementační pece.

Po ukončení nauhličení se vsázka převezde zpět do kalícího/transportního modulu, kde probíhá zakalení. Nakonec je vsázka zavezena do popouštěcí pece, kde se popouští na teplotu 170 °C/2 hod.

V cementační peci (obr. 3.4) probíhá tzv. pulzní cementace pomocí acetylénu ( $C_2H_2$ ) s proplachem dusíku ( $N_2$ ) mezi jednotlivými pulzy. Ohřev v cementační peci probíhá nejprve konvektivně pomocí dusíku přibližně při tlaku 1200 mbar a poté při dosažení teploty 950 °C se tlak sníží na cca 10 mbar a dochází k přepnutí na radiační ohřev. K ohřevu slouží 12 grafitových topných tyčí rozmístěných rovnoměrně v peci. Rovnoměrné proudění acetylénu zajišťuje systém trubek s ventilátorem. Dále jsou v dolní části pece 2, resp. 3 nosné podpěry z SiC v závislosti na hmotnosti vsázky. [8, 9, 15, 16]





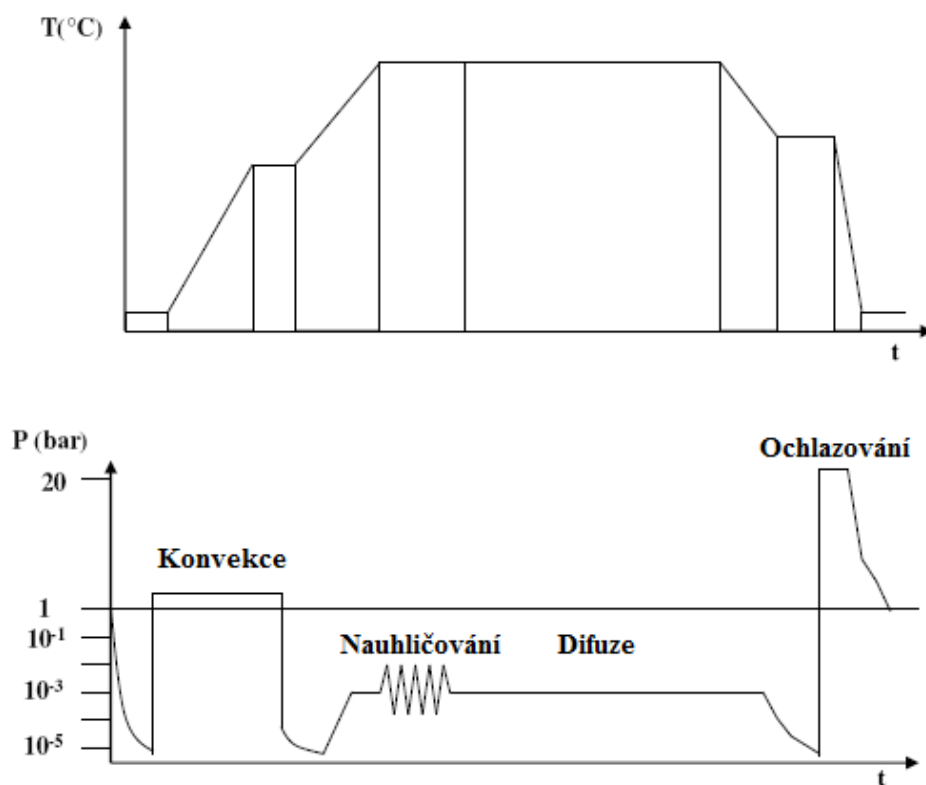
Obr. 3.4. Pohled do cementační pece [9]

Kalící/transportní modul (obr. 3.5) má společnou nosnou konstrukci pro přepravní i kalící komoru a je vybaven transportními vidlemi o nosnosti 1000 kg s krokovým posunem pro šetrný přesun vsázky. Pohon vidlí zajišťuje frekvenční měnič. Vidle jsou v horní části opatřeny izolačními deskami k zamezení tepelného namáhání vidlí při kontaktu s ohřátou vsázkou. V kalící komoře probíhá kalení v přetlaku plynu. V našem případě bylo použito hélia, jenž má vyšší ochlazovací schopnost než dusík. Směr přívodu plynu je možno nastavit tak, aby ochlazoval vsázku shora, zdola nebo střídavě v pravidelných intervalech. Nastavit lze také tlak plynu, avšak maximálně 18 bar. [8, 9, 15, 16]

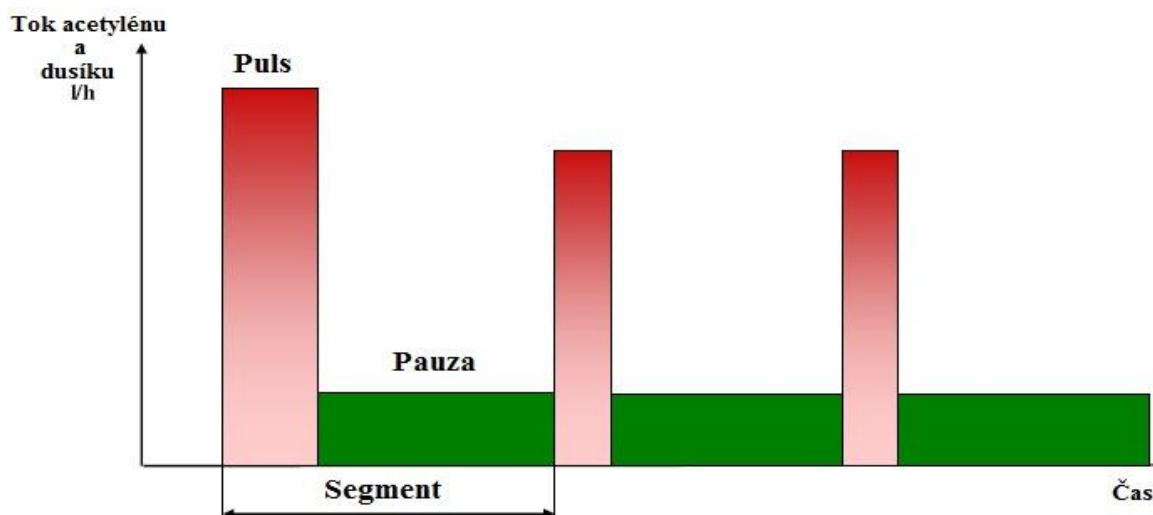


Obr. 3.5. Pohled do kalícího/transportního modulu [9]

Na obr. 3.6 je zobrazen průběh teploty a tlaku při vakuové pulzní cementaci a kalení v přetlaku plynu. Podrobnější zobrazení jednotlivých pulzů je na obr. 3.7.



Obr. 3.6. Průběh teploty a tlaku při vakuové pulzní cementaci a kalení v přetlaku plynu [8]



Obr. 3.7. Vakuová pulzní cementace [8]

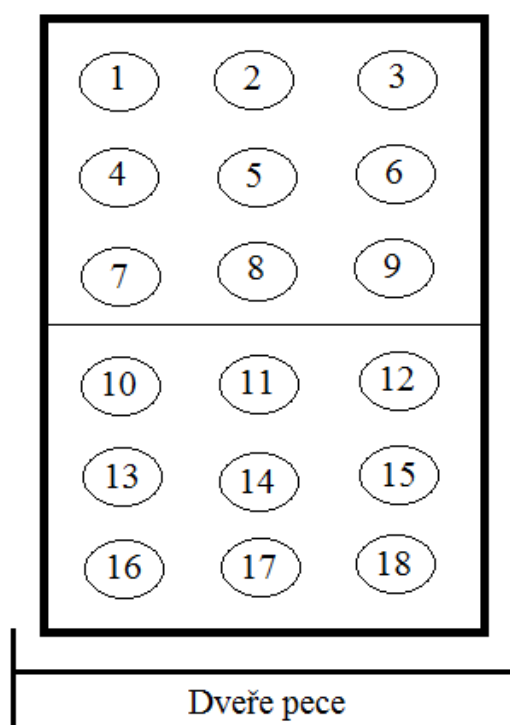
### 3.3. Příprava vzorků a postup měření

#### 3.3.1. Příprava a měření vzorků

Pro atmosférickou cementaci a kalení v oleji bylo připraveno 441 kusů, jejichž převážná část byla zařazena zpět do výroby. U vybraných vzorků bylo také provedeno měření tvrdosti povrchu a jádra, hloubka cementace a metalografický rozbor. Měření bylo prováděno ve 3 sériích vždy po 147 kusech. Ozubená kola byla měřena „za měkka“ (nezakalená) i po zakalení a odečítala se vždy minimální a maximální odchylka od jmenovitého rozměru etalonu. Všechny kusy byly před zpracováním očíslovány pro vyloučení záměny. Měřilo se stažení vnitřního otvoru a ovalita. Pro měření bylo použito dílenské měřidlo s číselníkovým úchylkoměrem lícovaným po 2  $\mu\text{m}$  (obr. 3.8). Ozubená kola zpracovávaná v oleji byla uložena v 18 roštích o 9 patrech. Způsob uložení v roštích ve spodním patře je patrný z obr. 3.9. Rozložení všech 147 kusů v jednotlivých patrech je součástí přílohy č. 1.



Obr. 3.8. Měření vnitřního otvoru ozubeného kola [9]



Obr. 3.9. Schéma uložení ozubených kol v roštích (spodní patro)

Příprava a měření kol určených ke zpracování ve vakuové peci bylo shodné s kusy kalenými v oleji jen s tím rozdílem, že nebylo zpracováno tak velké množství kusů. Všechny kusy byly určeny k vlastnímu experimentu a nebyly tedy vráceny zpět do výroby. I v tomto případě bylo u vybraných kusů provedeno měření tvrdosti a metalografický rozbor.

Zpracování atmosférickou cementací a kalení v oleji byl již dříve optimalizovaný proces, avšak tepelné zpracování ve vakuu nikoliv. I z tohoto důvodu probíhal experiment pouze na 70 kusech a opakovalo se 7 sérií vždy po 10 kusech v jedné vsázce. Celá vsázka byla složena z 16 roštů v 8 patrech a bylo možné zpracovávat až 144 kusů v jednom cyklu. Abychom jsme se co nejvíce přiblížili reálnému procesu, tak zbylá místa v roštích byla vyplněna vyřazenými (zmetkovými) kusy. Jak již bylo zmíněno, zpracovávalo se vždy jen 10 kusů, které byly při každé sérii uloženy na stejných místech v roštích (viz. příloha č. 2). Pro nalezení souvislostí mezi parametry procesu a deformacemi byly nastaveny rozdílné zpracovávací programy. Zkoumal se vliv velikosti tlaku plynu a kalící teploty na deformace vnitřního otvoru ozubeného kola.

### 3.3.2. Měření deformací

**Deformace otvoru** se počítaly dle vztahu:

$$\Delta = D_{SM} - D_{SK} \quad (3.1)$$

$D_{SM}$  – střední hodnota průměru otvoru „měkkého“ (nezakaleného) kola [mm]

$D_{SK}$  – střední hodnota průměru otvoru kaleného kola [mm]

**Střední hodnota průměru** se počítala dle vztahu:

$$D_S = (D_{MIN} + D_{MAX})/2 \quad (3.2)$$

$D_{MIN}$  – minimální průměr otvoru kola [mm]

$D_{MAX}$  – maximální průměr otvoru kola [mm]

**Ovalita** se počítala dle vztahu:

$$O = |D_{MAX} - D_{MIN}| \quad (3.3)$$

### 3.3.3. Měření tvrdosti

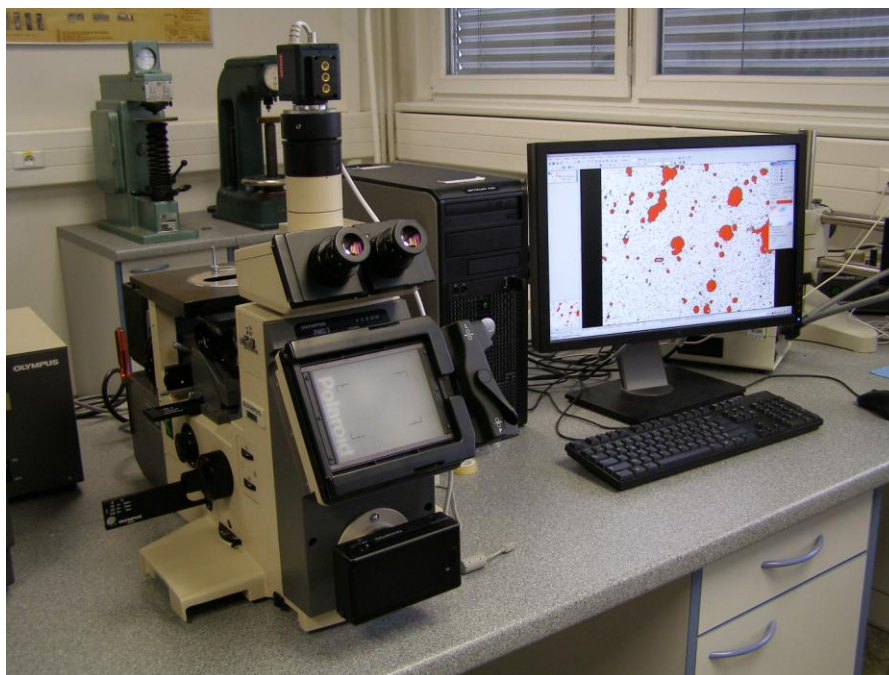
Tvrdost kalených kol byla měřena na digitálním tvrdoměru Wolpert Group s Vickersovým indentorem nastaveným na zatížení 294 N (HV30) a zjišťována byla na povrchu (spodní čelo věnce) i v jádře (pata a střed zubu) dle normy EN ISO 6507-1. Měření byla prováděna celkem u 5 vzorků kalených v oleji a 7 vzorků kalených v přetlaku hélia. Dále byly vypočteny průměrné hodnoty tvrdosti povrchu (průměr ze 4 měření) a jádra (průměr z 2 měření) u jednotlivých kusů. [9]

### 3.3.4. Měření mikrotvrdosti

Měření mikrotvrdosti probíhalo automaticky na mikro/makro tvrdoměru Leco AMH 43 metodou HV0.5. Tato metoda měření slouží ke stanovení hloubky cementační vrstvy dle normy EN ISO 2639. Mikrotvrdost byla měřena vždy na obou stranách zubu a to na bocích a v patě zubu. Měřeno bylo stejné množství vzorků jako v předchozím případě (5 vzorků – olej, 7 vzorků - hélium). [9]

### 3.3.5. Metalografický rozbor

Struktura kalených kol byla studována pouze na 2 vzorcích na světelném mikroskopu Olympus PMG 3 (obr. 3.10) a cílem bylo porovnání výsledných struktur vzorků zpracovaných atmosférickou cementací s kalením v oleji a vakuovou cementací s kalením v přetlaku hélia. Vzorky byly lisovány za tepla do bakelitu Phenocure G na přístroji ProntoPress-20. Dále byly broušeny a leštěny. K vyvolání struktury byl použit 2 % nital. [9]



Obr. 3.10. Světelný mikroskop Olympus PMG 3 [9]

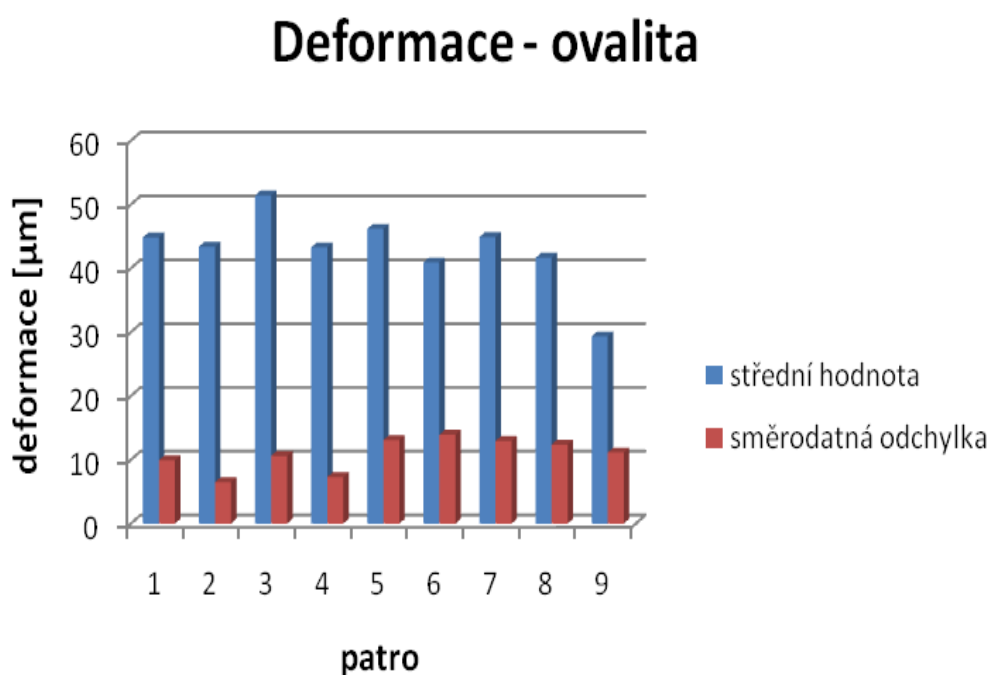


## 4. Výsledky a jejich vyhodnocení

### 4.1. Výsledky deformací

#### 4.1.1. Výsledky deformací v oleji

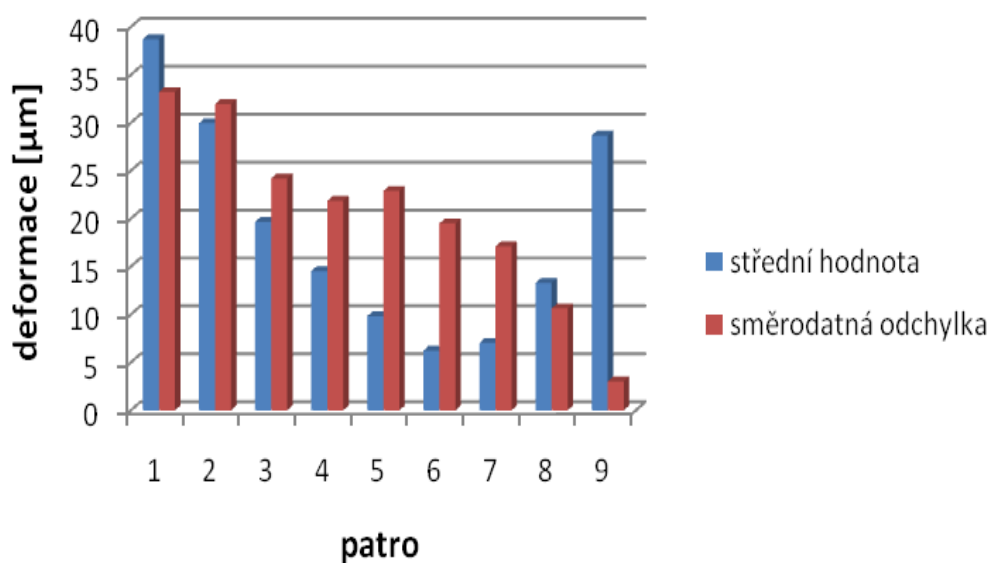
Celkové tvarové deformace, tj. ovalita, kusů kalených v oleji v závislosti na jednotlivých patrech jsou patrné z grafu 4.1. Zde je vidět nahodilost deformací, jenž se projevila i u jednotlivých dílčích měření. Největší ovalita byla naměřena u kusů ve 3. patře, nejmenší pak v posledním patře.



Graf 4.1. Celkové tvarové deformace (ovalita) kusů kalených v oleji v závislosti na jednotlivých patrech

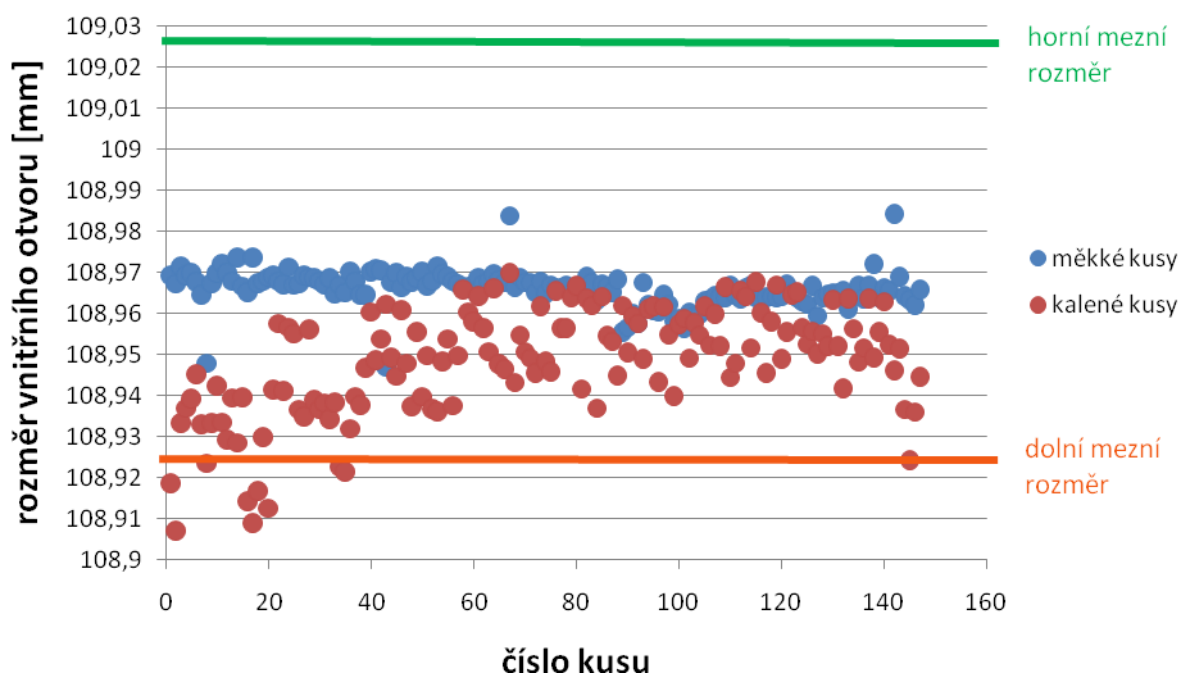
Celkové deformace rozměrové, tj. stažení vnitřního otvoru, již vykazovaly určitou závislost. Zpravidla nejvíce se stahovaly kusy, které byly ponořeny do kalící lázně jako první. Deformace stažení vnitřního otvoru v závislosti na jednotlivých patrech jsou zobrazeny v grafu 4.2. Porovnání jednotlivých kusů ve vsázce před zakalením a po zakalení je zobrazeno v grafu 4.3.

## Deformace - stažení vnitřního otvoru



Graf 4.2. Deformace stažení vnitřního otvoru v závislosti na jednotlivých patrech

## Střední hodnoty vnitřního otvoru před a po kalení - olej



Graf 4.3. Průměrné deformace stažení vnitřního otvoru jednotlivých kusů ve vsázce



#### 4.1.2. Výsledky deformací ve vakuu

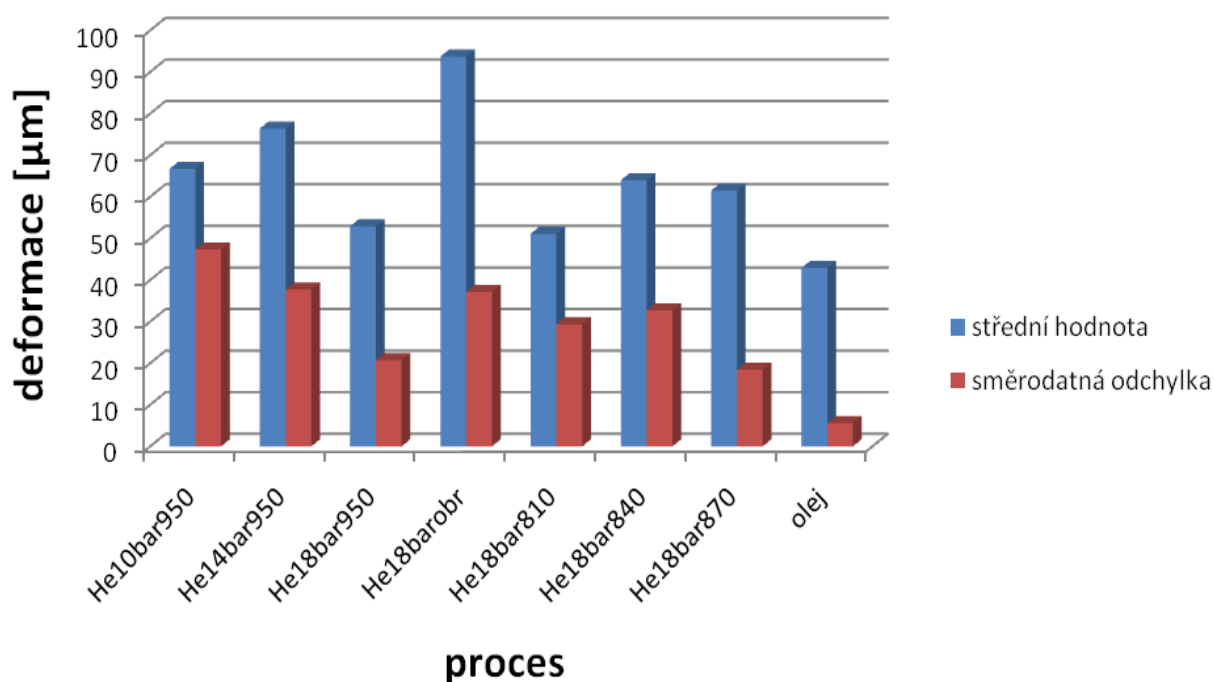
Celkové deformace ve vakuu byly zkoumány na sedmi různých procesech. Jednalo se o 3 procesy s různými tlaky hélia, a to 10 bar (proces č. 1), 14 bar (proces č. 2) a 18 bar (proces č. 3). Ve všech třech případech se jednalo o kalení z cementační teploty 950 °C. Dále byl na 3 procesech zkoumán vliv kalící teploty na deformace, kdy se teplota, při které probíhalo nauhličování, snížila postupně na kalící teplotu 810 °C (proces č. 5), 840 °C (proces č. 6) a 870 °C (proces č. 7). U těchto tří předcházejících procesů byl nastaven tlak hélia vždy na 18 bar. Na jednom procesu byl zkoumán vliv šaržování ozubených kol na deformace (proces č. 4), kdy byla kola uložena zkosenou hranou směrem nahoru, tedy naopak než je tomu obvykle. Tento proces byl totožný s procesem o tlaku hélia 18 bar a kalením z cementační teploty. Pro srovnání procesů cementace ve vakuu s kalením v přetlaku hélia a atmosférické cementace s kalením v oleji byl zahrnut i dříve optimalizovaný proces č. 8 (olej).

Nejmenší ovalita kol zpracovaných ve vakuu byla naměřena u procesu č. 5 s kalením z teploty 810 °C a její hodnota byla 51,1 µm. Největší hodnota u procesu č. 4, tedy u obráceného uložení kol v rostech, a to 93,7 µm. Tvarové změny jednotlivých procesů jsou zřejmé z grafu 4.4. Konkrétní hodnoty deformací jsou v tab. 4.1.

Porovnání jednotlivých procesů z hlediska ovality [µm]			
proces	popis	průměr	směr.odchylka
1	10bar950	66,7	47,3
2	14bar950	76,4	37,7
3	18bar950	52,9	20,7
4	18barobr	93,7	37,1
5	18bar810	51,1	29,3
6	18bar840	64,0	32,7
7	18bar870	61,5	18,4
8	olej	42,9	5,6

Tab. 4.1. Ovalita otvoru u jednotlivých procesů ve vakuu a v oleji

## Porovnání ovality jednotlivých procesů ve vakuu a v oleji



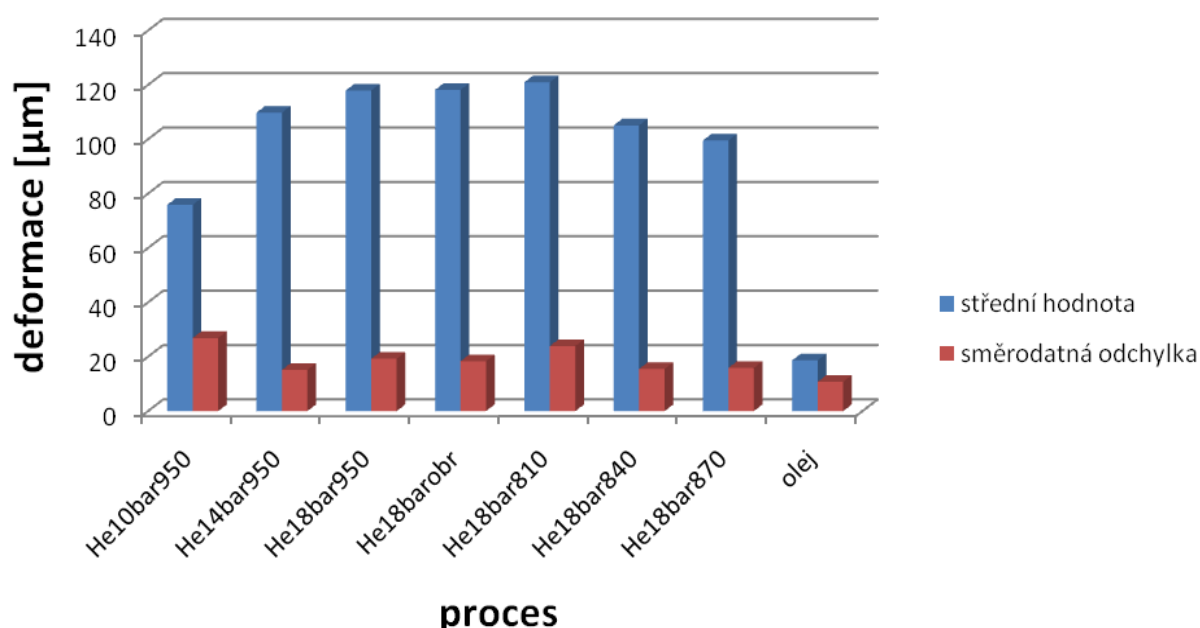
Graf 4.4. Porovnání ovality jednotlivých procesů ve vakuu a v oleji

Největší stažení 120,95  $\mu\text{m}$  bylo zjištěno u procesu č. 5 s kalením z teploty 810 °C. Nejméně se stahovaly ozubená kola zpracována v procesu č. 1, tedy kalena tlakem 10 bar a hodnota stažení byla 75,85  $\mu\text{m}$ . Porovnání stažení vnitřního otvoru u jednotlivých procesů je zobrazeno v grafu 4.5. Konkrétní hodnoty stažení otvoru nám udává tab. 4.2.

Porovnání jednotlivých procesů z hlediska stažení vnitřního otvoru [ $\mu\text{m}$ ]			
proces	popis	průměr	směr.odchylka
1	10bar950	75,9	26,9
2	14bar950	109,8	15,2
3	18bar950	118,0	19,3
4	18barobr	118,2	18,3
5	18bar810	121,0	23,9
6	18bar840	105,1	15,5
7	18bar870	99,6	15,9
8	olej	18,7	10,8

Tab. 4.2. Stažení otvoru u jednotlivých procesů ve vakuu  
a v oleji

## Porovnání stažení vnitřního otvoru jednotlivých procesů ve vakuu a v oleji



Graf 4.5. Porovnání stažení vnitřního otvoru jednotlivých procesů ve vakuu a v oleji

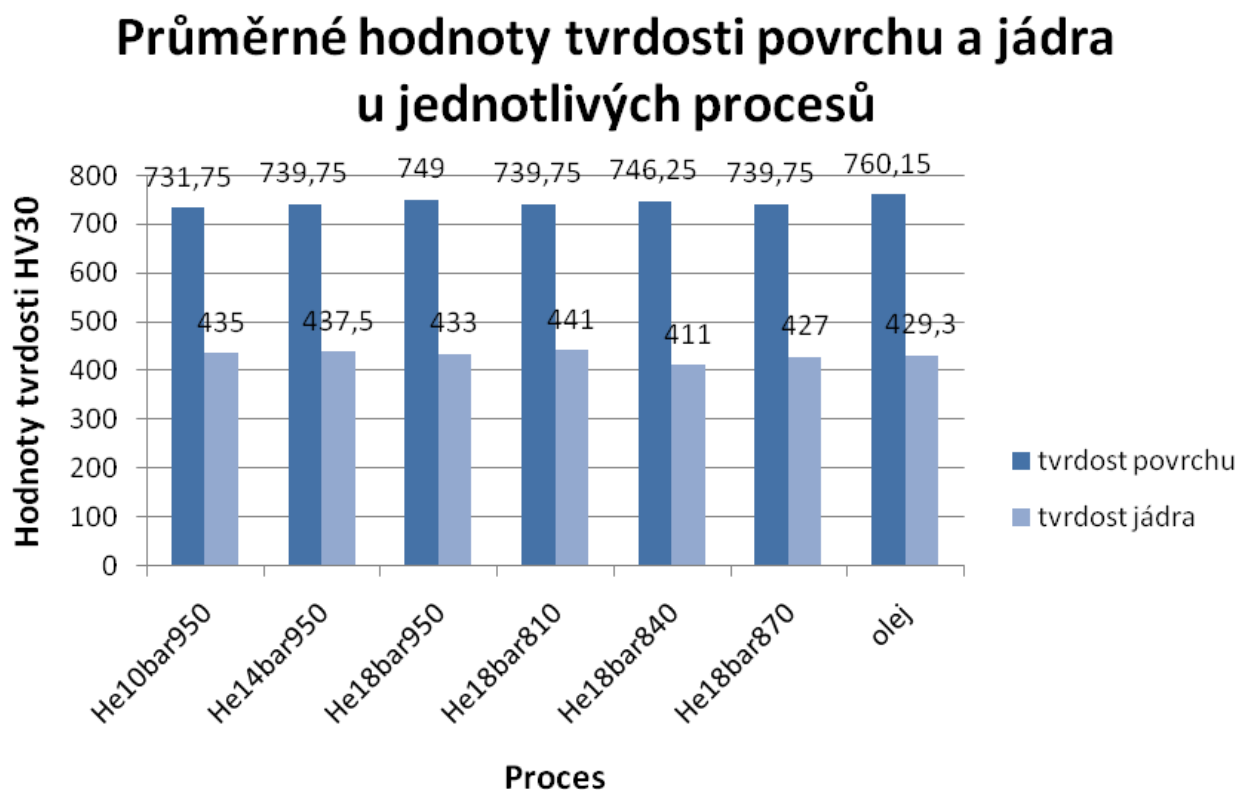
### 4.2. Výsledky tvrdosti

U většiny měřených vzorků byla naměřena tvrdost povrchu i jádra v rozmezí předepsaných hodnot. Jen u kusu č. 1 zpracovávaného ve vakuu procesem č. 6 (kalení z 840 °C) a u kusu č. 106 zpracovávaného v oleji z první série měření byly naměřené hodnoty v některých případech velmi blízko spodní hranici předepsané meze tvrdosti jádra v patě zubu. Při kalení v přetlaku hélia byly hodnoty tvrdosti povrchu v porovnání s kalením v oleji o trochu nižší. Graf 4.6 zobrazuje průměrné hodnoty tvrdosti povrchu a jádra u jednotlivých procesů.

U hnaného kola rozvodovky s označením 02T 409 156 H jsou předepsané hodnoty povrchu a jádra následující:

**Povrch – Předpis:  $\geq 680$  HV30**

**Jádro – Předpis (pata zubu):  $400 \div 500$  HV30**



Graf 4.6. Průměrné tvrdosti povrchu a jádra vzorků zpracovaných jednotlivými procesy

### 4.3. Výsledky mikrotvrdosti

U všech měřených vzorků byla dosažená hloubka cementace dle předpisu, který je pro hnané kolo rozvodovky (02T 409 156 H) stanoven:

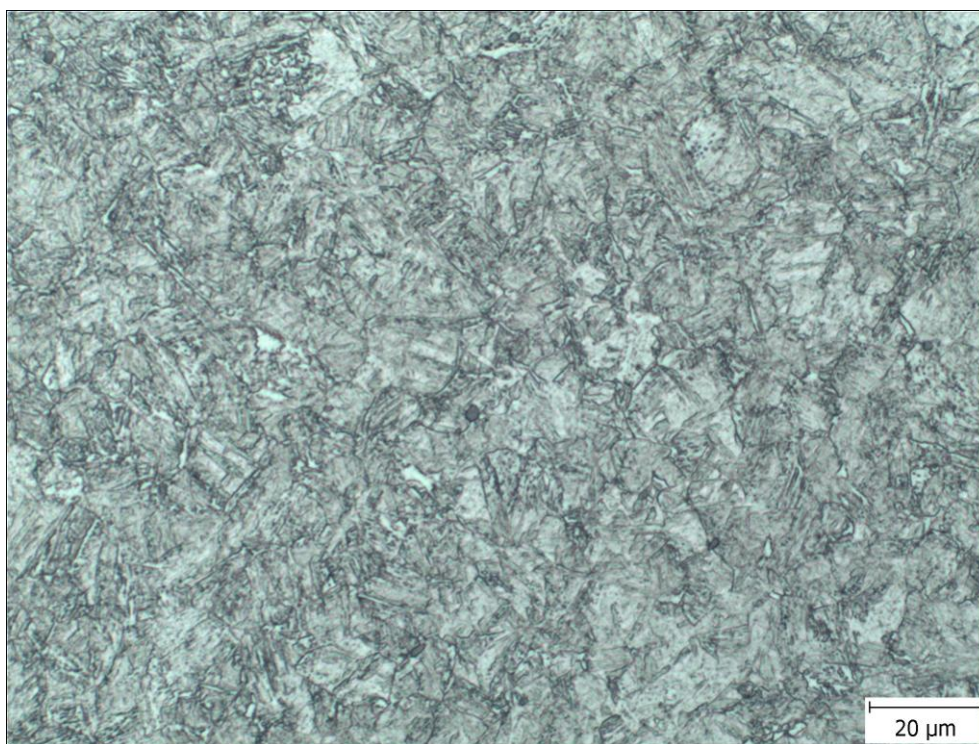
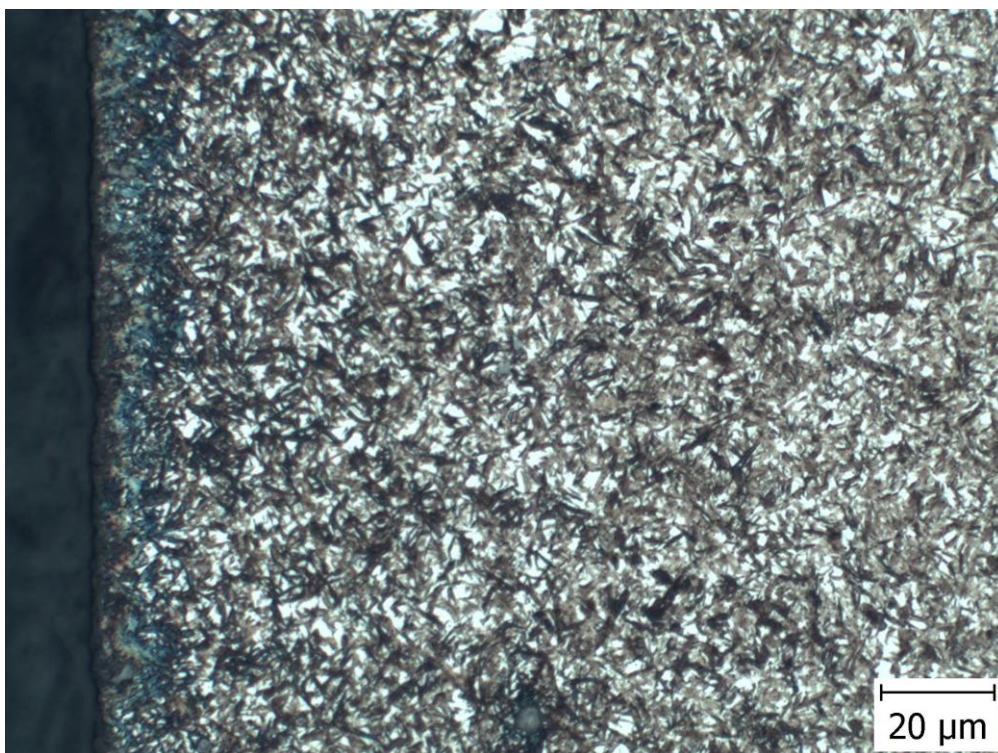
**CHD 550 0,6 ÷ 0,9 mm**

Protokoly o měření hloubky cementace jsou součástí přílohy č. 3.

### 4.4. Porovnání metalografie

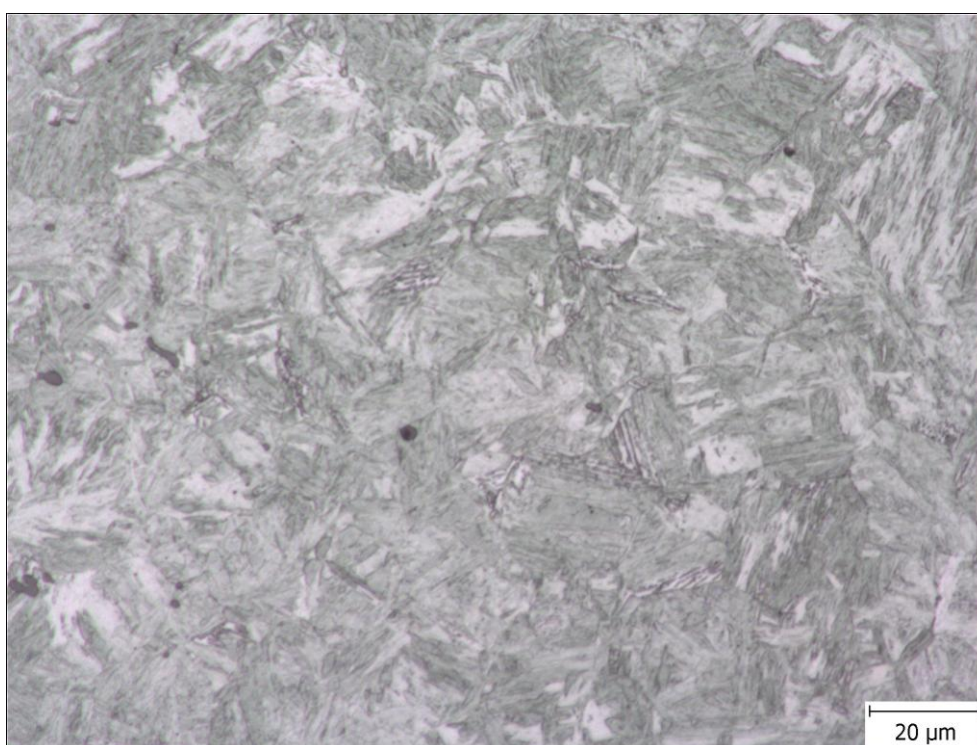
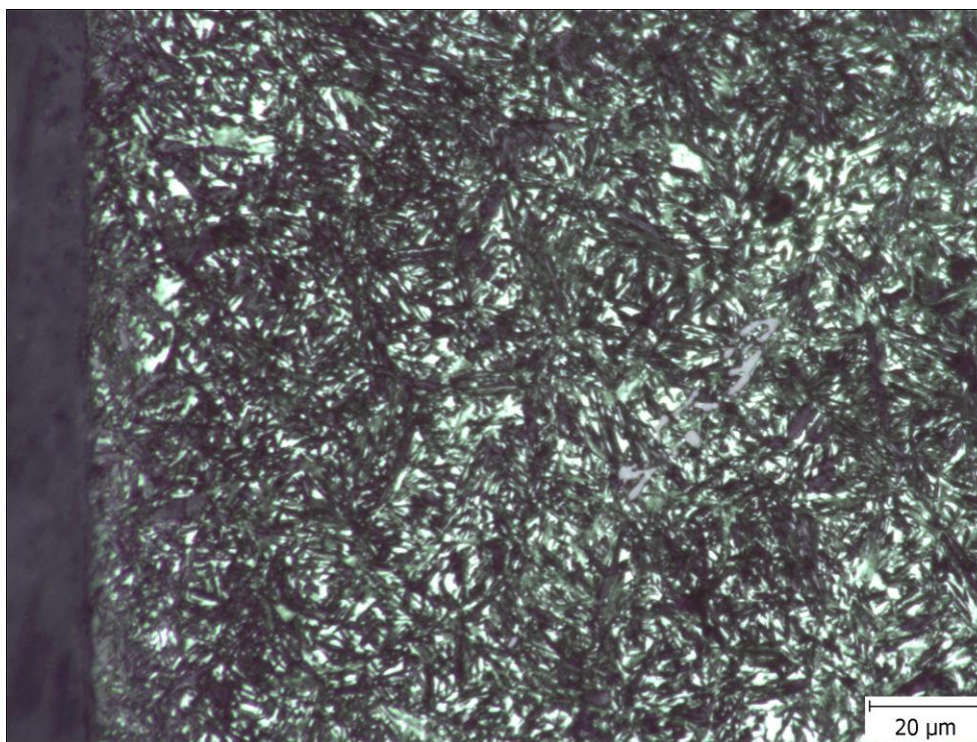
Mikrostruktura povrchu a jádra obou vzorků je zobrazena na obr. 4.6 a obr. 4.7, z nichž je patrné, že povrch byl tvořen martenzitem a zbytkovým austenitem a jádro mělo martenziticko - bainitický charakter. Obsah zbytkového austenitu se pohyboval v obou případech v rozmezí 20 až 30 %.





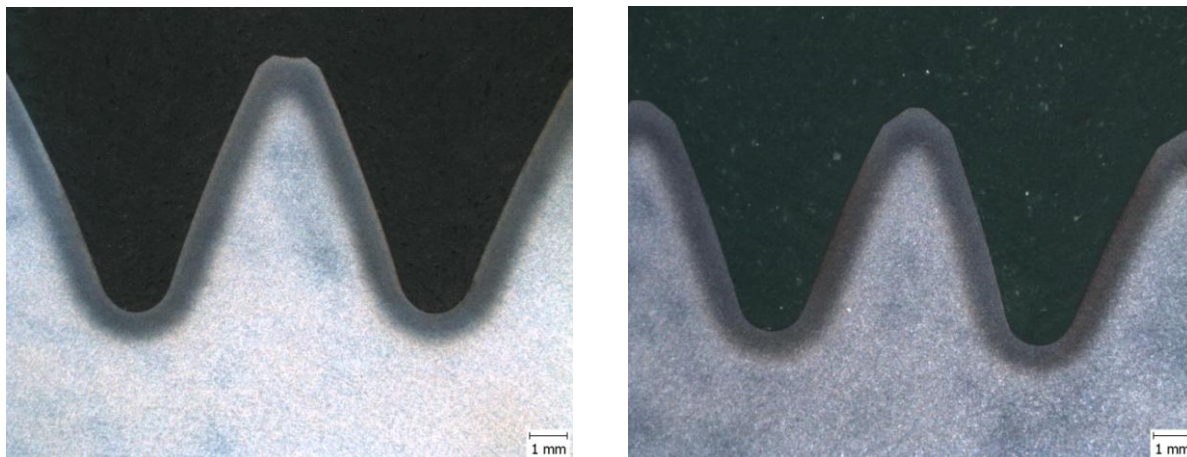
Obr. 4.6. Mikrostruktura povrchu (nahore) a jádra (dole) ozubených kol kalených v oleji (zvětšeno 500krát) [9]





Obr. 4.7. Mikrostruktura povrchu (nahore) a jádra (dole) ozubených kol kalených ve vakuu (zvětšeno 500krát) [9]

Na obr. 4.8 je pro názornost zobrazena makrostruktura profilu ozubeného kola, na níž je vidět hloubka nauhličené vrstvy, která byla v obou případech téměř shodná cca 0,8 mm.



Obr. 4.8. Nauhličená vrstva: atmosférická cementace (vlevo) a vakuová cementace (vpravo) [9]

#### 4.5. Srovnání ekonomiky provozu atmosférické cementace s kalením v oleji a vakuové cementace s kalením v přetlaku plynu

Při porovnávání nákladů atmosférické cementace s kalením v oleji a vakuové cementace s kalením v přetlaku hélia byly brány v úvahu pouze náklady na jednotlivá média a elektrickou energii a jejich spotřeba při zpracování jedné vsázky. Náklady na obsluhu zařízení nebyly zahrnuty. Cena zpracování jedné vsázky atmosférickou cementací s kalením v oleji včetně praní a popouštění byla cca 5 120 Kč, přičemž jen samotný proces cementace s kalením stál cca 4 510 Kč. Naproti tomu cena zpracování vsázky vakuovou cementací s kalením v přetlaku hélia včetně praní a popouštění byla vypočtena cca 1 850 Kč.

Z uvedených údajů je patrné, že proces vakuové cementace je v porovnání s atmosférickou cementací přibližně o dvě třetiny levnější, co se týče provozu. V tabulce 4.3 je uvedena cena jednoho dílu u obou dvou způsobů tepelného zpracování. [9, 15]

Porovnání cen (1 díl): ALD/Aichelin (1 € = 24,13 Kč)		
Proces	vakuová cementace + He	atmosférická cementace + olej
Počet ks/vsázka	144	147
Cena/díl [Kč]	12,82	34,82
Cena/díl [€]	0,53	1,44

Tab. 4.3. Porovnání cen\* jednoho dílu při zpracování vakuovou cementací s kalením v přetlaku hélia a atmosférickou cementací s kalením v oleji [9]

\*Uvedené ceny platné k dubnu 2011

## 5. Diskuse

Tato práce měla za úkol seznámení s nově zavedeným způsobem tepelného zpracování, tj. vakuovou cementací s kalením v přetlaku hélia, ve firmě Škoda Auto. Dále bylo sledováno deformační chování hnaného kola rozvodovky po atmosférické cementaci s kalením v oleji a vakuové cementaci s kalením v přetlaku hélia. Deformace byly měřeny u vnitřního otvoru ozubeného kola a zkoumalo se stažení otvoru a jeho ovalita. Z naměřených hodnot byly vytvořeny grafy deformací porovnávající jednotlivé procesy tepelného zpracování.

Kalení v oleji prokázalo závislost stažení otvoru na jednotlivých patrech roštu, kdy k největšímu stažení otvoru docházelo u kusů, které byly ponořeny jako první do kalicí lázně. U ovality nebyla vyzorována žádná závislost na způsobu rozložení jednotlivých kusů. Tvrdost a hloubka cementační vrstvy u vybraných kusů splňovaly požadavky technické dokumentace.

Při kalení v přetlaku hélia byly zkoumány odlišné procesy, kde byl měněn tlak plynu a kalicí teplota. Bylo nutné jeden z uvedených procesů vybrat jako nejvhodnější z hlediska deformačního chování a poté navrhnout rozměr vnitřního otvoru, aby po tepelném zpracování splňoval požadavky výkresové dokumentace. S přihlédnutím k naměřeným výsledkům deformací byl zvolen pro zpracování ve vakuu proces č. 7, tedy kalení tlakem 18 bar z teploty 870 °C. Střední hodnota ovality u tohoto procesu byla 61,5 μm a největší hodnoty 96 μm dosahovala u kusu č. 5 v pátém patře. Stažení vnitřního otvoru bylo průměrně 99,55 μm a největší bylo vyzorováno u kusu č. 10 v posledním patře, kde dosahovalo hodnoty 121,5 μm (viz. příloha č. 4). Všechny kusy zpracované ve vakuu, které byly vybrány k měření tvrdosti a hloubky cementace, vyhovovaly předpisu technické dokumentace. Zde lze sledovat mírnou závislost mezi tvrdostí povrchu a tlakem hélia. Čím vyšší byl tlak hélia, tím vyšší byla i tvrdost na povrchu kola.

Ve srovnání s kalením v oleji byly u všech procesů ve vakuu tvarové i rozměrové změny (ovalita a stažení) větší, což bylo patrně dáno tím, že atmosférická cementace s kalením v oleji byl již optimalizovaný proces, avšak procesy ve vakuu nikoliv.

Vnitřní otvor kola by měl po tepelném zpracování být v rozmezí hodnot 108,925 až 109,025 mm. Vzhledem k prvním pokusům s vakuovou cementací a omezenému množství změřených kusů nebylo dosaženo podrobnějšího sledování deformačního chování otvoru ozubeného kola. Na základě naměřených výsledků byl předběžně doporučen průměr otvoru před tepelným zpracováním  $109,025_{-0,05}^0$  mm, aby se výsledný rozměr otvoru po tepelném zpracování přibližně vyskytoval v předepsaných mezích, bez ohledu na to, zda byl zpracován atmosférickou nebo vakuovou cementací. Pokud bychom brali v úvahu zpracování jen procesem ve vakuu, průměr otvoru kola by bylo vhodné vyrábět o rozměru  $109,025_0^{0,05}$  mm. Tento rozměr otvoru by však nevyhovoval zpracování atmosférickou cementací.

Z hlediska nákladů na média a energie u jednotlivých procesů se jeví výhodnější proces vakuové cementace s kalením v přetlaku hélia než proces atmosférické cementace s kalením v oleji. Bylo zajímavé dlouhodobější sledování obou procesů, kde by byly brány v úvahu i pořizovací náklady a získána návratnost vložených nákladů.



## 6. Závěr

Závěry této práce jsou následující:

- V práci bylo proměřeno 441 kusů ozubených kol zpracovaných atmosférickou cementací s kalením v oleji a 70 kusů stejných kol zpracovaných však vakuovou cementací s kalením v přetlaku hélia.
- Při atmosférické cementaci a kalení v oleji docházelo k největším rozměrovým deformacím u kusů, které byly ponořeny jako první do kalící lázně, tj. u kusů ve spodních patrech roštu.
- Pro zpracování vakuovou cementací a kalení v přetlaku hélia byl vzhledem k deformačnímu chování zvolen proces kalení z kalící teploty 870 °C o tlaku hélia 18 bar.
- Na základě prvních naměřených výsledků doporučuji pro další postupy dodávat ozubená kola o průměru vnitřního otvoru  $109,025^{+0}_{-0,05}$  mm, aby byla vhodná ke zpracování v oleji a zároveň v přetlaku hélia a vznikaly co nejmenší ztráty spojené s následnými korekcemi vnitřního otvoru po tepelném zpracování.
- Proces zpracování ve vakuu vycházel cca o 60 % levněji ve srovnání s konvenčním atmosférickým způsobem tepelného zpracování, co se týkalo nákladů na jednotlivá média a energie.
- Naopak náklady na zařízení a příslušenství jsou u vakuové cementace mnohonásobně vyšší.

## **7. Seznam použité literatury**

- [1] MACEK, K.; ZUNA, P.; JANOVEC, J. Tepelné zpracování kovových materiálů. Praha : ČVUT, 2008.
- [2] MACEK, K.; ZUNA, P.; BARTOŠ, J. Nauka o materiálu II. Praha : SNTL, 1986.
- [3] PLUHAŘ, J. Nauka o materiálech. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [4] Tepelné zpracování ve vakuu : Bodycote. [online]. 2010, [cit. 2011-05-20]. Dostupný z WWW: <[www.bodycote.cz](http://www.bodycote.cz)>.
- [5] AICHELIN. Firemní podklady.
- [6] HLUCHÝ, M.; MODRÁČEK, O.; PAŇÁK, R. Strojírenská technologie 1 : Metalografie a tepelné zpracování. Praha : Scienta, spol. s.r.o., pedagogické nakladatelství, 2002.
- [7] PTÁČEK, L. a kolektiv. Nauka o materiálu I. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2003.
- [8] ALD Technologies. Firemní podklady.
- [9] ŠKODA AUTO, Mladá Boleslav. Firemní podklady.
- [10] DAĐOUREK, K. Podklady pro přednášky – Vybrané technologie povrchových úprav. TU v Liberci, 2006
- [11] HOTAŘ, A. Podklady pro přednášky – Tepelné zpracování a zkoušení materiálu. TU v Liberci, 2010-11
- [12] Suite101.com [online]. 2011 [cit. 2011-03-09]. Hardness testing of materials. Dostupné z WWW: < WWW: <http://www.suite101.com/content/hardness-testing-of-materials-a170509>>.
- [13] ASM Handbook. Vol. 4, Heat treating. Materials Park : ASM International, 1997.
- [14] Kalirna-vyskov.cz [online]. 2011 [cit. 2011-03-12]. Vakuové kalení. Dostupné z WWW: <<http://www.kalirna-vyskov.cz/vakuove-kaleni/>>.
- [15] Osobní konzultace s panem Ing. Petrem Šťastným, Mladá Boleslav, 2011.
- [16] Osobní konzultace s panem Ing. Josefem Podkovičkem, Mladá Boleslav, 2011.

[17] JURČI, P.; STOLAŘ, P.; PAVLŮ, L.; ALTENA H. Pokrokové trendy ve zpracování ozubených součástí s ohledem na minimalizaci deformací. In [online]. Hradec nad Moravicí, 2005 [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <[www.nanocon.cz](http://www.nanocon.cz)>.

## **8. Seznam příloh**

Příloha č. 1: Rozložení jednotlivých kusů v roštích při atmosférické cementaci

Příloha č. 2: Rozložení jednotlivých kusů v roštích při vakuové cementaci

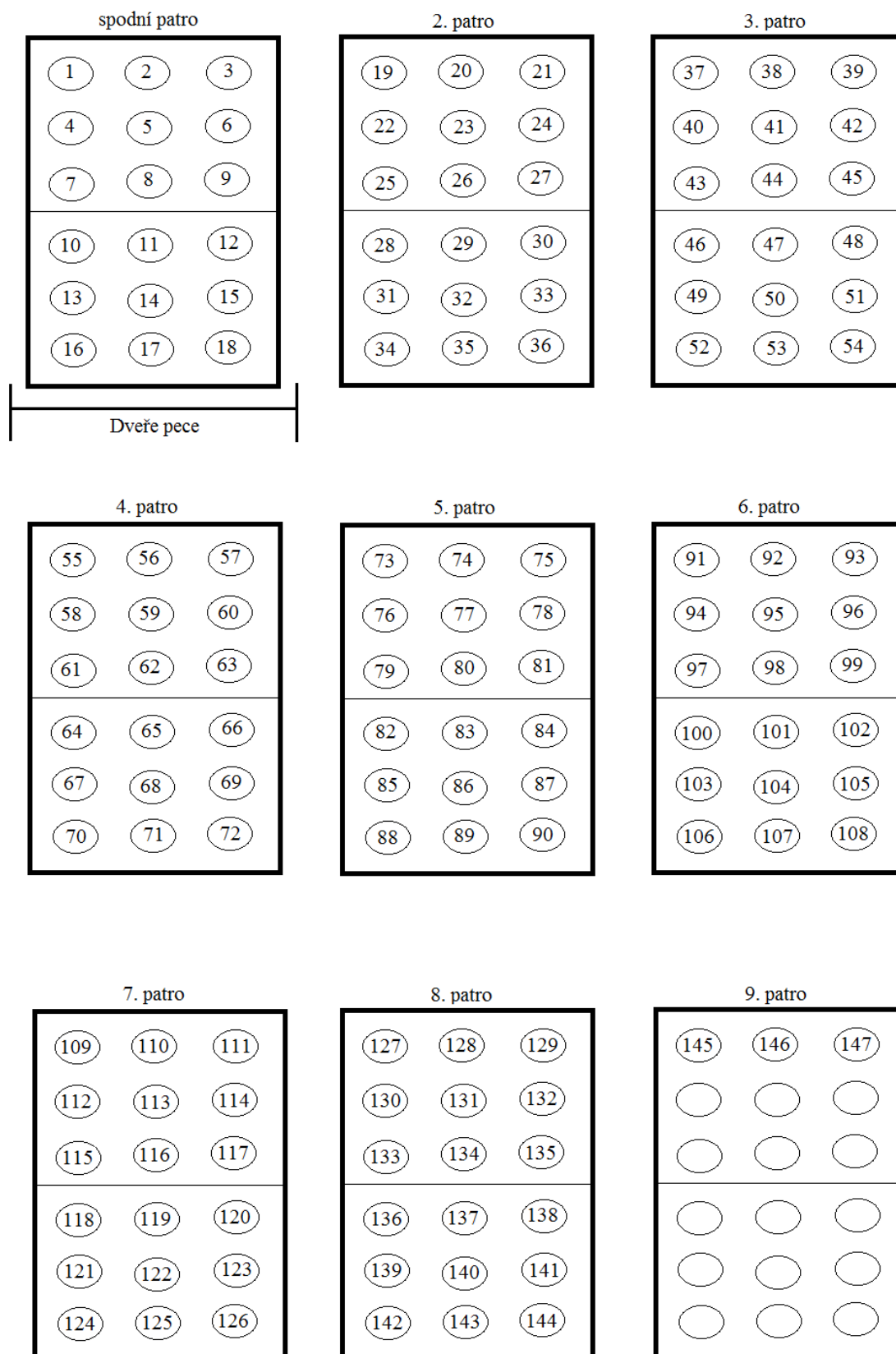
Příloha č. 3: Protokoly o stanovení hloubky cementace

Příloha č. 4: Grafy ovality a stažení otvoru u jednotlivých procesů ve vakuu

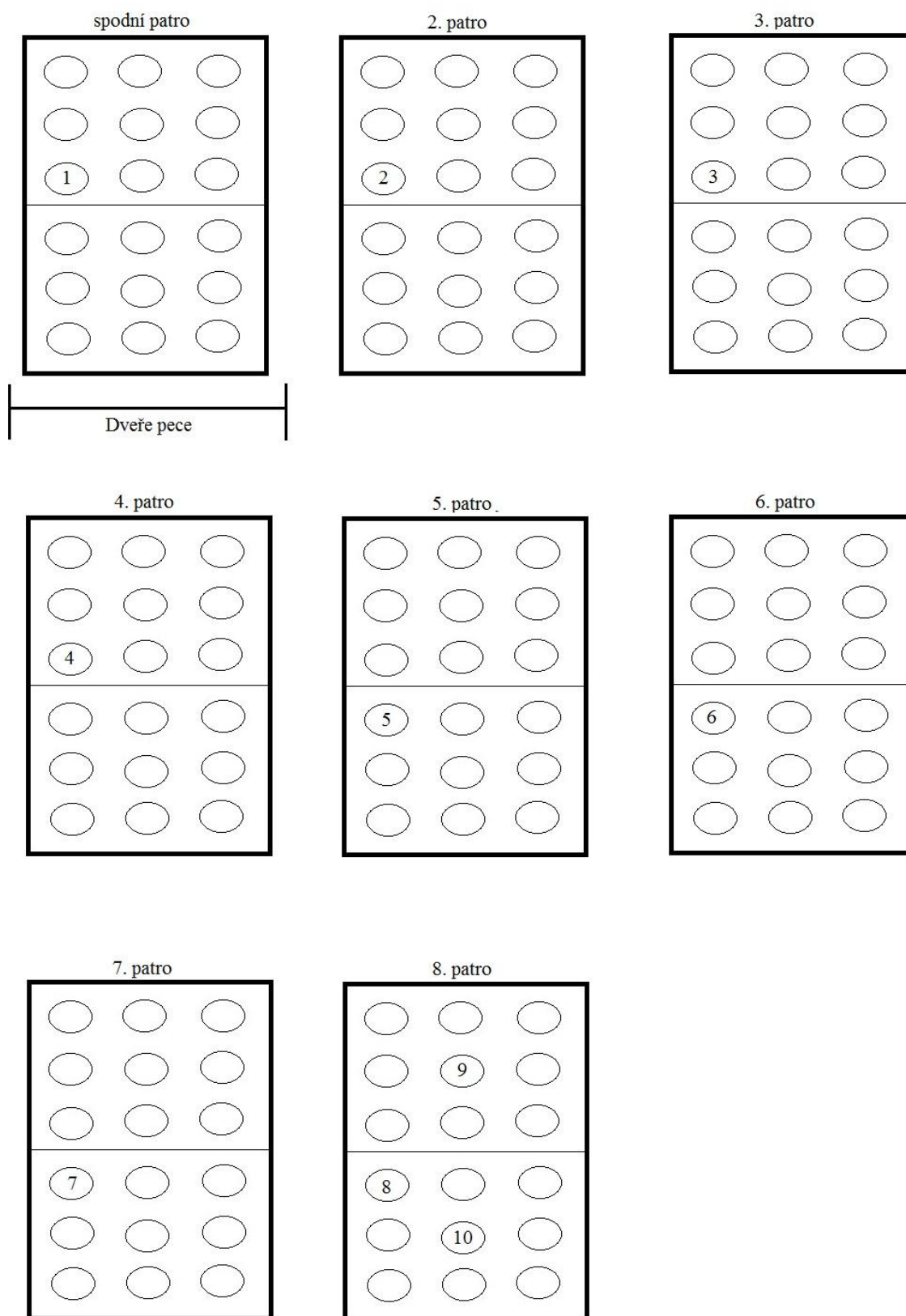
Příloha č. 5: Informace o výchozích vlastnostech oceli TL 4521

Příloha č. 6: Fotodokumentace kusu zpracovaného atmosférickou cementací s kalením v oleji  
a vakuovou cementací s kalením v přetlaku hélia

# Příloha č. 1: Rozložení jednotlivých kusů v roštích při atmosférické cementaci



## Příloha č. 2: Rozložení jednotlivých kusů v roštích při vakuové cementaci



## Příloha č. 3: Protokoly o stanovení hloubky cementace



ŠKODA AUTO a.s.  
293 60 Mladá Boleslav

VAH/31 Metalurgická laboratoř  
VAH/31 Metallurgisches Labor

Protokol o zkoušce č.  
Laborbericht Nr.

M 590/11

Příloha/Anlage 1

### Stanovení hloubky cementace dle EN ISO 2639

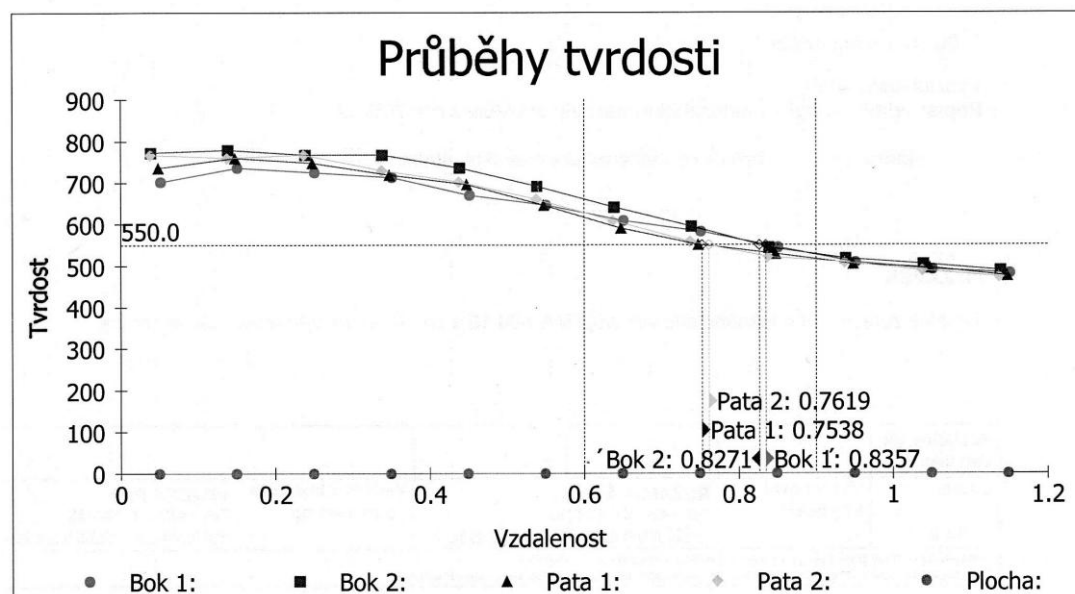
Číslo dílu:	02T 409 156 h
Materiál:	TL 4521
Předpis:	CHD 550 0,6 - 0,9 mm
Číslo vzorku:	590
Měřil:	IR

Metoda měření: HV 0.5

Proces: olej/kus č. 143

### Naměřené hodnoty

Vzdálenost (mm)	Bok zubu 1	Bok zubu 2	Pata zubu 1	Pata zubu 2	
0.05	702	773	737	767	0
0.15	737	780	761	761	0
0.25	725	767	748	767	0
0.35	714	767	719	731	0
0.45	671	737	697	702	0
0.55	646	692	646	661	0
0.65	609	641	591	609	0
0.75	583	596	551	559	0
0.85	544	544	529	522	0
0.95	508	518	505	508	0
1.05	492	505	495	488	0
1.15	482	488	476	473	0
CHD 550 (mm)	0.84	0.83	0.75	0.76	0.00



## Příloha č. 3: Protokoly o stanovení hloubky cementace



ŠKODA AUTO a.s.  
293 60 Mladá Boleslav

Protokol o zkoušce č.  
Laborbericht Nr.

M 917/11

VAH/31 Metalurgická laboratoř  
VAH/31 Metallurgisches Labor

Příloha/Anlage 1

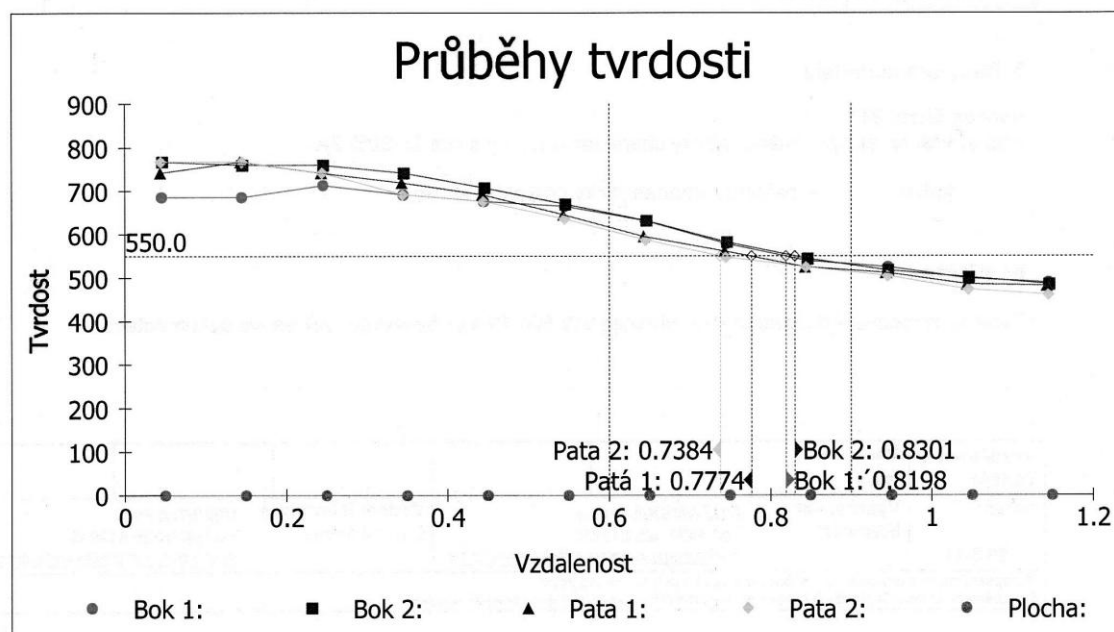
### Stanovení hloubky cementace dle EN ISO 2639

Číslo dílu:	02T 409 156 H
Materiál:	TL 4521
Předpis:	CHD 550 0,6 - 0,9 mm
Číslo vzorku:	917
Měřil:	IR

Metoda měření: HV 0.5  
Proces: olej/kus č. 2

### Naměřené hodnoty

Vzdálenost (mm)	Bok zubu 1	Bok zubu 2	Pata zubu 1	Pata zubu 2	
0.05	686	767	742	767	0
0.15	686	761	767	767	0
0.25	714	761	742	742	0
0.35	692	742	719	692	0
0.45	676	708	692	676	0
0.55	666	671	646	636	0
0.65	631	631	596	587	0
0.75	579	583	563	547	0
0.85	540	544	525	525	0
0.95	525	518	511	505	0
1.05	498	501	485	473	0
1.15	488	485	482	461	0
CHD 550 (mm)	0.82	0.83	0.78	0.74	0.00





## Příloha č. 3: Protokoly o stanovení hloubky cementace



ŠKODA AUTO a.s.  
293 60 Mladá Boleslav

VAH/31 Metalurgická laboratoř  
VAH/31 Metallurgisches Labor

Protokol o zkoušce č.  
Laborbericht Nr.

M 918/11

Příloha/Anlage 1

### Stanovení hloubky cementace dle EN ISO 2639

Číslo dílu:	02T 409 156 H
Materiál:	TL 4521
Předpis:	CHD 550 0,6 - 0,9 mm
Číslo vzorku:	918
Měřil:	IR

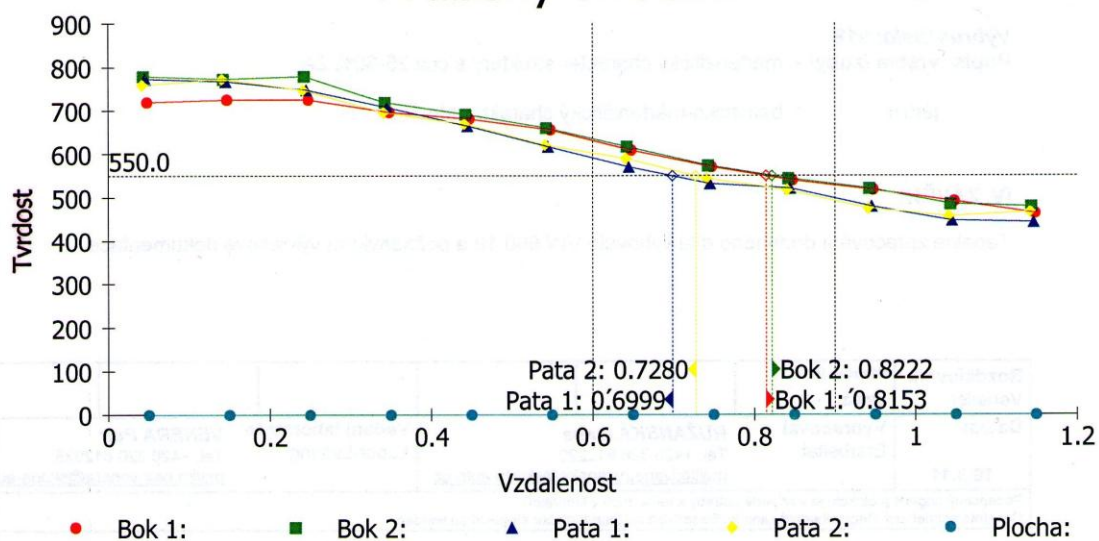
Metoda měření: HV 0.5

Proces: olej/kus č. 146

### Naměřené hodnoty

Vzdálenost (mm)	Bok zubu 1	Bok zubu 2	Pata zubu 1	Pata zubu 2	
0.05	719	780	773	761	0
0.15	725	773	767	773	0
0.25	725	780	748	748	0
0.35	697	719	708	697	0
0.45	681	692	666	671	0
0.55	656	661	618	622	0
0.65	609	618	571	591	0
0.75	571	575	533	544	0
0.85	540	544	522	518	0
0.95	518	522	479	476	0
1.05	492	485	447	458	0
1.15	464	479	444	467	0
CHD 550 (mm)	0.82	0.82	0.70	0.73	0.00

### Průběhy tvrdosti



## Příloha č. 3: Protokoly o stanovení hloubky cementace



ŠKODA AUTO a.s.  
293 60 Mladá Boleslav

VAH/31 Metalurgická laboratoř  
VAH/31 Metallurgisches Labor

Protokol o zkoušce č.  
Laborbericht Nr.

M 1030/11

Příloha/Anlage 1

### Stanovení hloubky cementace dle EN ISO 2639

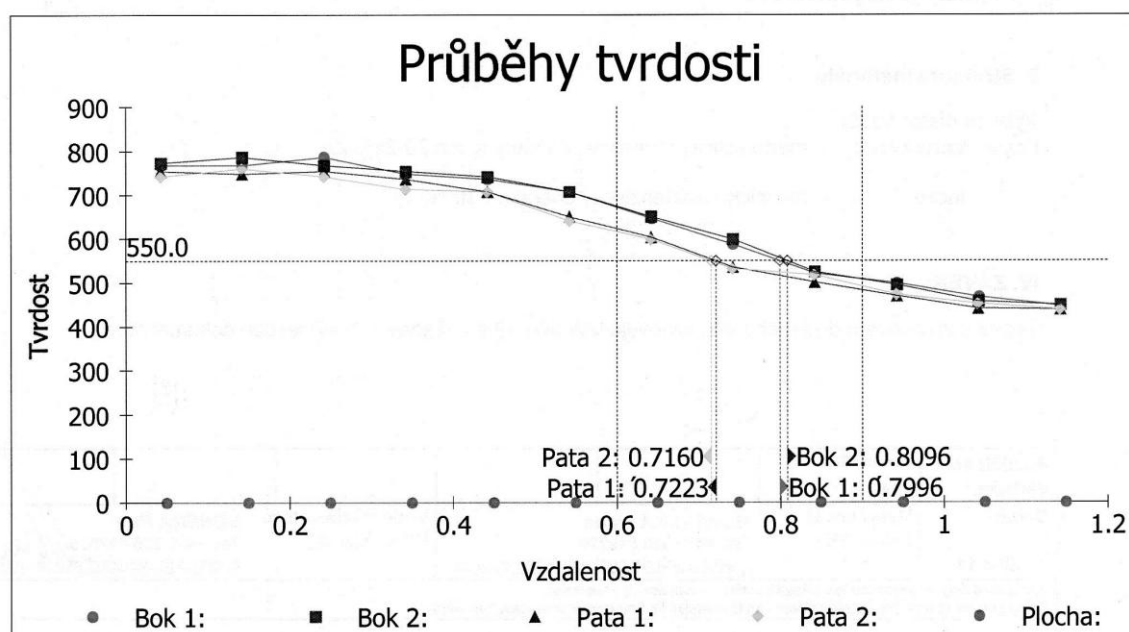
Číslo dílu:	02T 409 156 H
Materiál:	TL 4521
Předpis:	CHD 550 0,6 - 0,9 mm
Číslo vzorku:	1030
Měřil:	IR

Metoda měření: HV 0.5

Proces: vakuum 10 bar

### Naměřené hodnoty

Vzdálenost (mm)	Bok zubu 1	Bok zubu 2	Pata zubu 1	Pata zubu 2	
0.05	767	773	755	742	0
0.15	767	786	748	761	0
0.25	786	767	755	742	0
0.35	748	755	737	714	0
0.45	737	742	708	708	0
0.55	708	708	651	641	0
0.65	646	651	604	600	0
0.75	587	600	536	533	0
0.85	522	525	501	518	0
0.95	498	495	470	473	0
1.05	467	458	441	452	0
1.15	447	450	439	439	0
CHD 550 (mm)	0.80	0.81	0.72	0.72	0.00





## Příloha č. 3: Protokoly o stanovení hloubky cementace



ŠKODA AUTO a.s.  
293 60 Mladá Boleslav

VAH/31 Metalurgická laboratoř  
VAH/31 Metallurgisches Labor

Protokol o zkoušce č.  
Laborbericht Nr.

M 1289/11

Příloha/Anlage 1

### Stanovení hloubky cementace dle EN ISO 2639

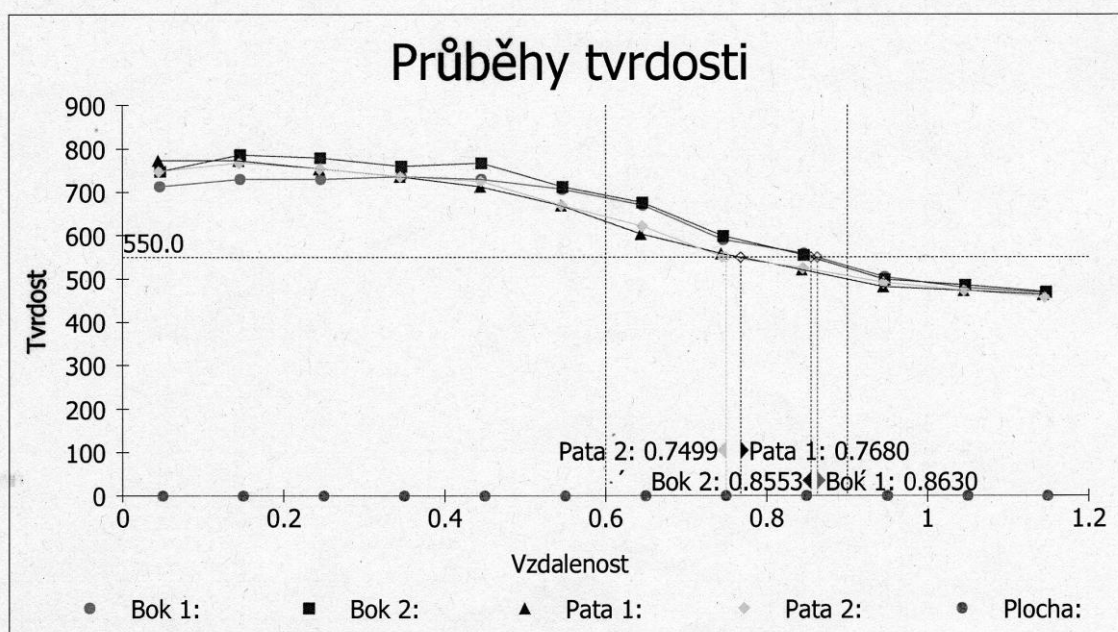
Číslo dílu:	02T 409 156 H
Materiál:	TL 4521
Předpis:	CHD 550 0,6 - 0,9 mm
Číslo vzorku:	1289
Měřil:	IR

Metoda měření: HV 0.5

Proces: vakuum 14 bar

### Naměřené hodnoty

Vzdálenost (mm)	Bok zubu 1	Bok zubu 2	Pata zubu 1	Pata zubu 2	
0.05	714	748	773	748	0
0.15	731	786	773	767	0
0.25	731	780	755	755	0
0.35	737	761	737	737	0
0.45	731	767	714	725	0
0.55	708	714	671	671	0
0.65	671	676	604	622	0
0.75	591	600	559	551	0
0.85	559	555	522	525	0
0.95	505	498	482	492	0
1.05	479	485	473	473	0
1.15	467	470	464	458	0
CHD 550 (mm)	0.86	0.86	0.77	0.75	0.00



## Příloha č. 3: Protokoly o stanovení hloubky cementace



ŠKODA AUTO a.s.  
293 60 Mladá Boleslav

Protokol o zkoušce č.  
Laborbericht Nr.

M 921/11

VAH/31 Metalurgická laboratoř  
VAH/31 Metallurgisches Labor

Příloha/Anlage 1

### Stanovení hloubky cementace dle EN ISO 2639

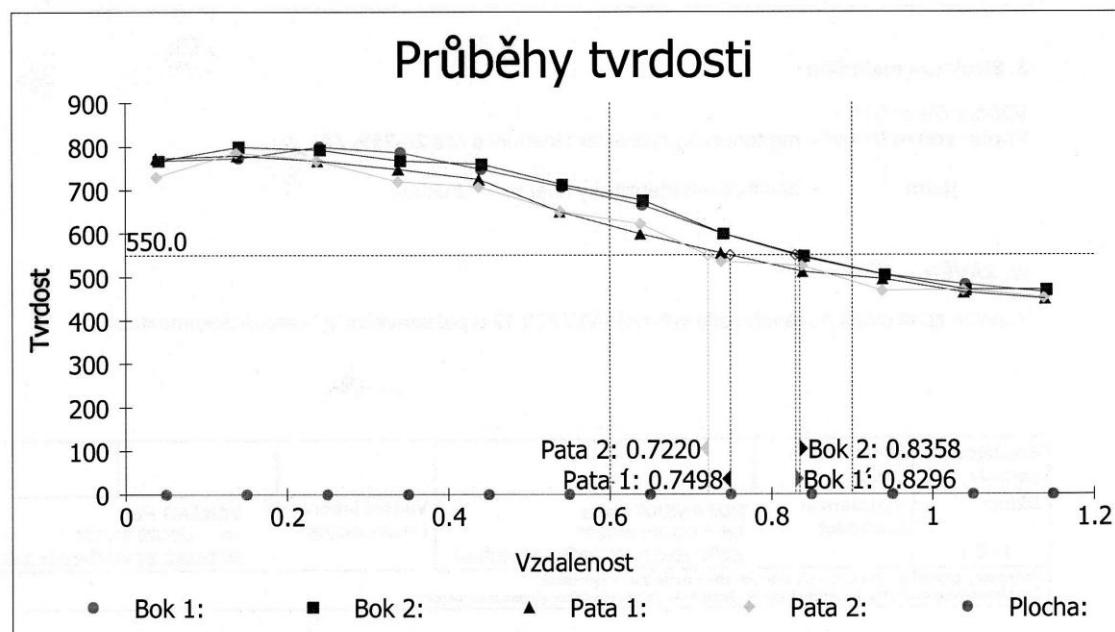
Číslo dílu:	02T 409 156 H
Materiál:	TL 4521
Předpis:	CHD 550 0,6 - 0,9 mm
Číslo vzorku:	921
Měřil:	IR

Metoda měření: HV 0.5

Proces: vakuum 18 bar/ kus č. 1

### Naměřené hodnoty

Vzdálenost (mm)	Bok zubu 1	Bok zubu 2	Pata zubu 1	Pata zubu 2	
0.05	767	767	773	731	0
0.15	773	799	780	786	0
0.25	799	793	767	767	0
0.35	786	767	748	719	0
0.45	748	761	725	708	0
0.55	708	714	651	651	0
0.65	666	676	600	622	0
0.75	600	600	555	536	0
0.85	544	547	511	525	0
0.95	505	505	495	467	0
1.05	482	470	464	470	0
1.15	464	470	450	452	0
CHD 550 (mm)	0.83	0.84	0.75	0.72	0.00



## Příloha č. 3: Protokoly o stanovení hloubky cementace



ŠKODA AUTO a.s.  
293 60 Mladá Boleslav

Protokol o zkoušce č.  
Laborbericht Nr.

M 922/11

VAH/31 Metalurgická laboratoř  
VAH/31 Metallurgisches Labor

Příloha/Anlage 1

### Stanovení hloubky cementace dle EN ISO 2639

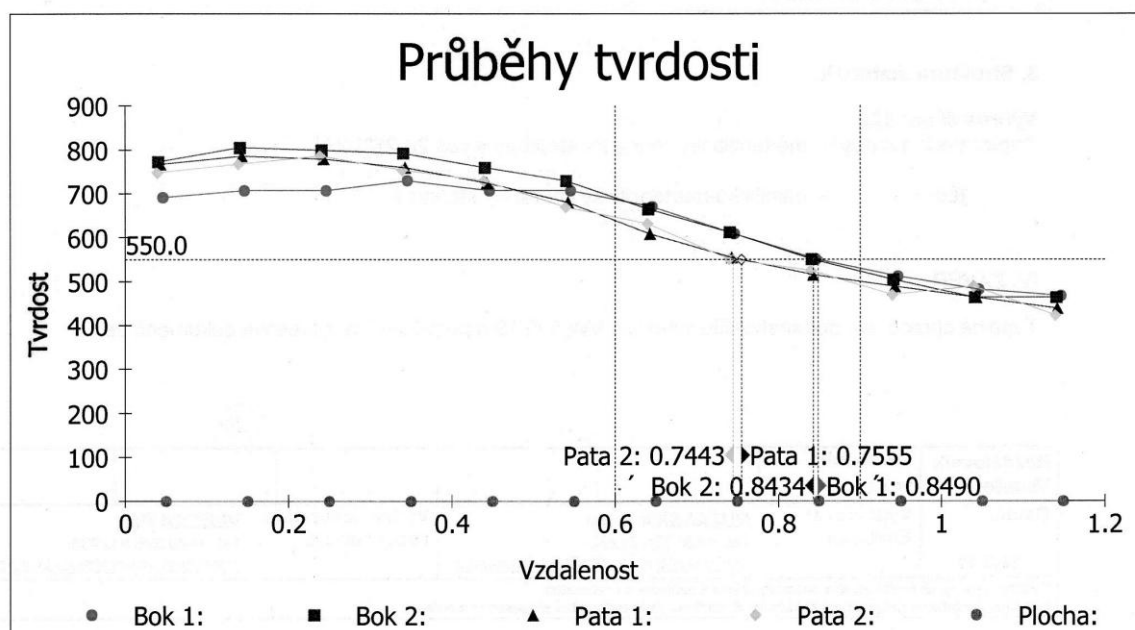
Číslo dílu:	02T 409 156 H
Materiál:	TL 4521
Předpis:	CHD 550 0,6 - 0,9 mm
Číslo vzorku:	922
Měřil:	IR

**Metoda měření: HV 0.5**

Proces: vakuum 18 bar/kus č. 9

### Naměřené hodnoty

Vzdálenost (mm)	Bok zubu 1	Bok zubu 2	Pata zubu 1	Pata zubu 2	
0.05	692	773	767	748	0
0.15	708	806	786	767	0
0.25	708	799	780	786	0
0.35	731	793	761	755	0
0.45	708	761	725	731	0
0.55	708	731	681	671	0
0.65	671	666	609	631	0
0.75	609	613	555	551	0
0.85	551	551	515	525	0
0.95	511	505	488	470	0
1.05	482	464	464	488	0
1.15	467	464	439	423	0
CHD 550 (mm)	0.85	0.84	0.76	0.74	0.00





## Příloha č. 3: Protokoly o stanovení hloubky cementace



ŠKODA AUTO a.s.  
293 60 Mladá Boleslav

Protokol o zkoušce č.  
Laborbericht Nr.

M 1332/11

VAH/31 Metalurgická laboratoř  
VAH/31 Metallurgisches Labor

Příloha/Anlage 1

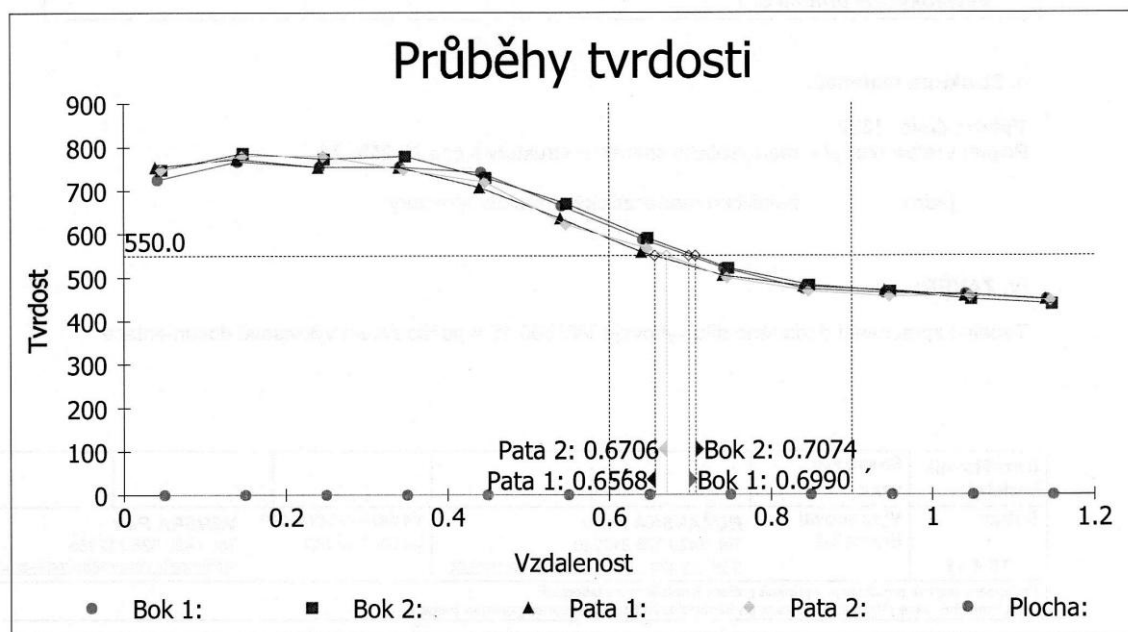
### Stanovení hloubky cementace dle EN ISO 2639

Číslo dílu:	02T 409 156 H
Materiál:	TL 4521
Předpis:	CHD 550 0,6 - 0,9 mm
Číslo vzorku:	1332
Měřil:	IR

Metoda měření: HV 0.5  
Proces: 810

### Naměřené hodnoty

Vzdálenost (mm)	Bok zubu 1	Bok zubu 2	Pata zubu 1	Pata zubu 2	
0.05	725	748	755	748	0
0.15	767	786	773	780	0
0.25	755	773	755	780	0
0.35	755	780	755	748	0
0.45	742	731	708	719	0
0.55	666	671	636	622	0
0.65	587	591	559	567	0
0.75	522	522	505	498	0
0.85	473	482	479	467	0
0.95	464	467	470	455	0
1.05	461	450	458	458	0
1.15	450	439	450	447	0
CHD 550 (mm)	0.70	0.71	0.66	0.67	0.00



## Příloha č. 3: Protokoly o stanovení hloubky cementace



ŠKODA AUTO a.s.  
293 60 Mladá Boleslav

VAH/31 Metalurgická laboratoř  
VAH/31 Metallurgisches Labor

Protokol o zkoušce č.  
Laborbericht Nr.

M 1360/11

Příloha/Anlage 1

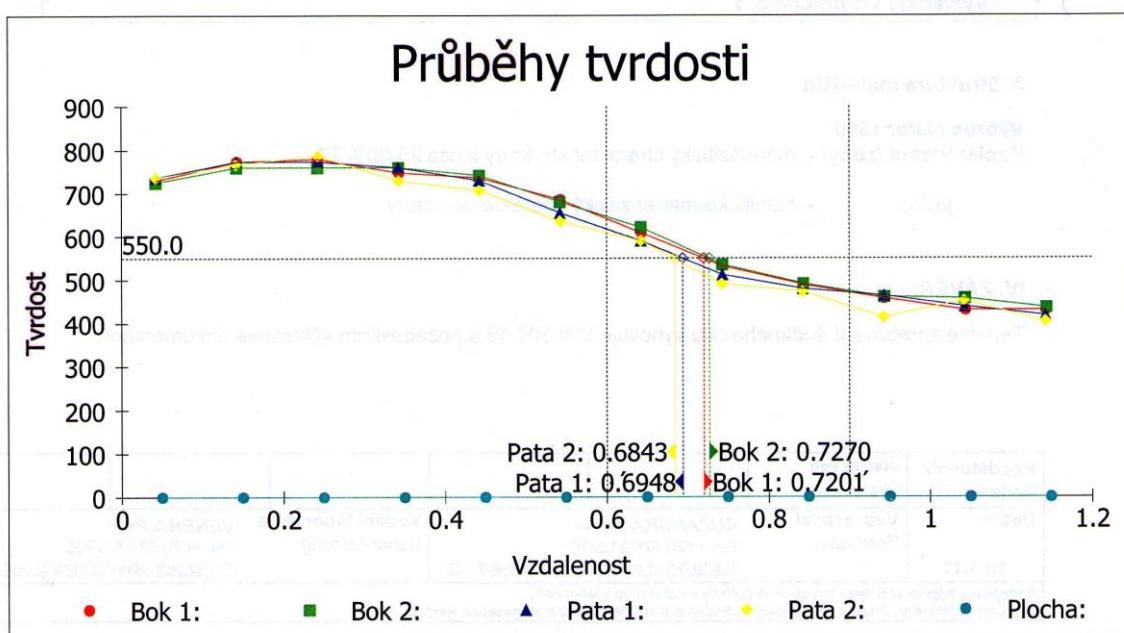
### Stanovení hloubky cementace dle EN ISO 2639

Číslo dílu:	02T 409 156 H
Materiál:	TL 4521
Předpis:	CHD 550 0,6 - 0,9 mm
Číslo vzorku:	1360
Měřil:	IR

Metoda měření: HV 0.5  
Proces: 840

### Naměřené hodnoty

Vzdálenost (mm)	Bok zubu 1	Bok zubu 2	Pata zubu 1	Pata zubu 2	
0.05	731	725	737	737	0
0.15	773	761	773	767	0
0.25	780	761	773	786	0
0.35	748	761	761	731	0
0.45	737	742	731	708	0
0.55	686	681	656	636	0
0.65	609	622	591	591	0
0.75	533	536	511	492	0
0.85	488	492	479	473	0
0.95	458	461	464	415	0
1.05	431	458	439	452	0
1.15	431	436	418	405	0
CHD 550 (mm)	0.72	0.73	0.69	0.68	0.00



## Příloha č. 3: Protokoly o stanovení hloubky cementace



ŠKODA AUTO a.s.  
293 60 Mladá Boleslav

Protokol o zkoušce č.  
Laborbericht Nr.

1508/11

VAH/31 Metalurgická laboratoř  
VAH/31 Metallurgisches Labor

Příloha/Anlage 1

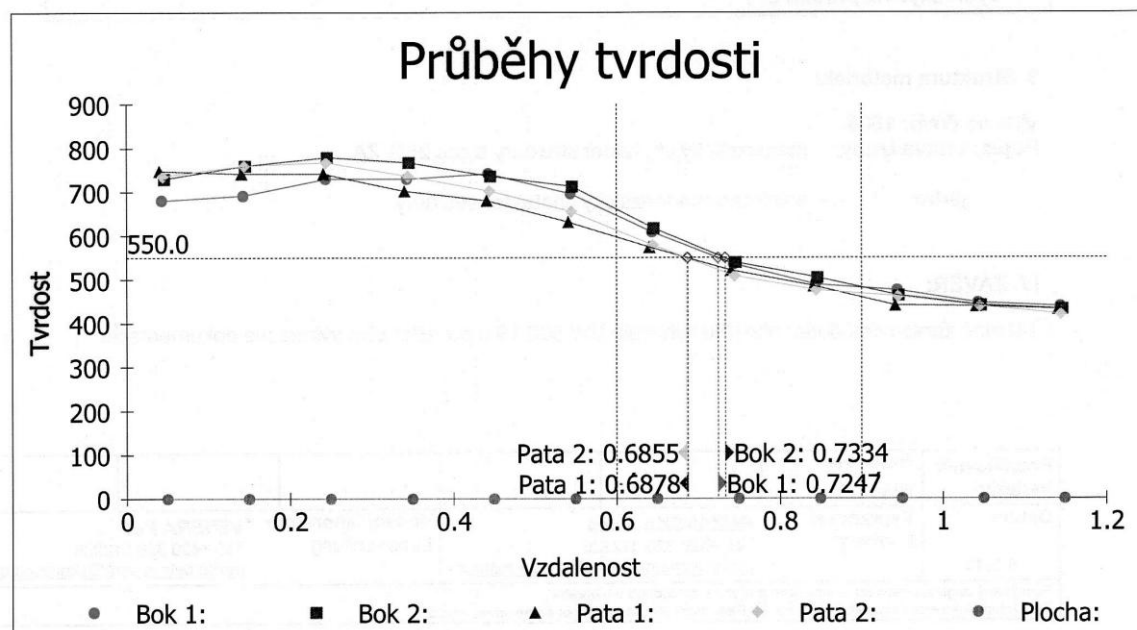
### Stanovení hloubky cementace dle EN ISO 2639

Číslo dílu:	02T 409 156 H
Materiál:	TL 4521
Předpis:	CHD 550 0,6 - 0,9 mm
Číslo vzorku:	1508
Měřil:	IR

Metoda měření: HV 0.5  
Proces: 870

### Naměřené hodnoty

Vzdálenost (mm)	Bok zubu 1	Bok zubu 2	Pata zubu 1	Pata zubu 2	
0.05	681	731	748	737	0
0.15	692	761	742	761	0
0.25	731	780	742	767	0
0.35	731	767	702	737	0
0.45	742	737	681	702	0
0.55	697	714	631	656	0
0.65	609	618	575	579	0
0.75	536	540	522	508	0
0.85	488	505	485	476	0
0.95	476	464	441	461	0
1.05	447	441	439	439	0
1.15	439	433	433	420	0
CHD 550 (mm)	0.72	0.73	0.69	0.69	0.00





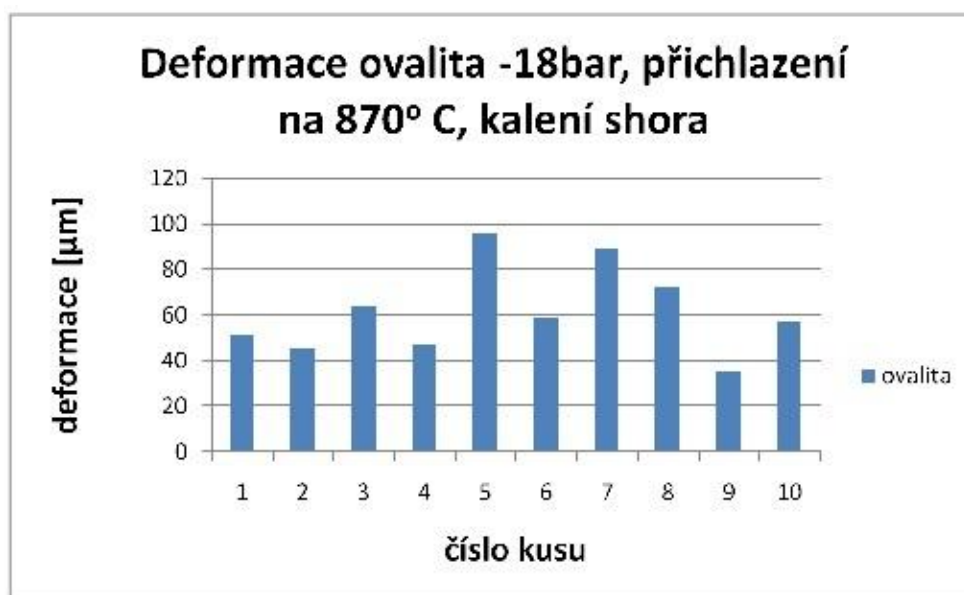
Příloha č. 4: Grafy ovality a stažení otvoru u jednotlivých procesů ve vakuu



Příloha č. 4: Grafy ovality a stažení otvoru u jednotlivých procesů ve vakuu



Příloha č. 4: Grafy ovality a stažení otvoru u jednotlivých procesů ve vakuu



Příloha č. 4: Grafy ovality a stažení otvoru u jednotlivých procesů ve vakuu



Příloha č. 4: Grafy ovality a stažení otvoru u jednotlivých procesů ve vakuu





## Příloha č. 5: Informace o výchozích vlastnostech oceli TL 4521

 <b>ŠKODA AUTO a.s.</b> 293 60 Mladá Boleslav VAH/31 Metalurgická laboratoř VAH/31 Metallurgisches Labor		<b>Protokol o zkoušce č. M 148/11</b> <b>Laborbericht Nr.</b>	
		List/Blatt	1/1
<b>Předmět zkoušky</b> Vorgang	Hnané kolo rozvodovky R 02T 409 156 F	<b>Materiál/Norma</b> Werkstoff/Norm	TL 4521 EN 10084
<b>Účel zkoušky</b> Prüfungszweck	Materiálový rozbor výkovku Werkstoffanalyse	<b>Výrobce oceli/Rozměr</b> Stahlproduzent/Abmessung	Třinecké železářny Ø 68
<b>Odběratel</b> Abnehmer	ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav – Česká republika VW Kassel – Deutschland GEARBOX Prat - Spanien	<b>Tavba/Značka</b> Schmelze/Zeichen	21366 A
<b>Zadal</b> Auftraggeber	Vilím Milan, VAH-2 Tel. +420 326 812663 <a href="mailto:milan.vilim@skoda-auto.cz">mailto:milan.vilim@skoda-auto.cz</a>	<b>Počet vzorků/Pec</b> Probeteileanzahl/Ofen	3 ZEZ

### I. Výsledky / Untersuchungsergebnisse :

#### 1. Chemické složení / Chemische Zusammensetzung in Masse - % : \*) TL 4521

Prvek/Element Vzorek/Probe	C	Mn	Si	P	S	Cr	Al	Ti **)	Ni	Mo	O <sub>2</sub> **)	N **)
Předpis Vorschrift	0,15 ÷ 0,23	0,50 ÷ 0,80	≤ 0,12	≤ 0,035	0,025 ÷ 0,035	0,65 ÷ 0,85	0,015 ÷ 0,040	≤ 0,005	1,50 ÷ 1,90	0,28 ÷ 0,38	≤ 0,0025	≤ 0,015
1	0,21	0,80	0,11	0,012	0,035	0,70	0,017	0,002	1,58	0,308	0,0015	0,0065

\*) Za výsledky chemické analýzy zodpovídá – Kalista Vladimír

\*\*) certifikát výrobce oceli / Zertifikat des Stahlproduzenten

#### 2. Tvrdost / Härte : EN ISO 6506-1

Předpis/Vorschrift	149 ÷ 193 HBW 5/750					
Vzorek/Probe	1		2		3	
Hodnoty/Messwerte	162	164	164	163	162	163

#### 3. Prokalitelnost / Härtbarkeit \*\*) : EN ISO 642

Předpis/Vorschrift	Výsledek/Ergebnisse :
J 5 = 43 - 48 HRC	44
J 10 = 33 - 38 HRC	38

\*\*) certifikát výrobce oceli / Zertifikat des Stahlproduzenten

#### 4. Tepelné zpracování - struktura / Wärmebehandlung - Gefüge :

Předpis/Vorschrift : BG-S - perlit a ferit / BG-S - Perlit und Ferrit

Výsledek/Ergebnisse : Lamelární perlit+ferit / Lamellarer Perlit + Ferrit

Velikost zrna / Korngröße : 8,5 EN ISO 643

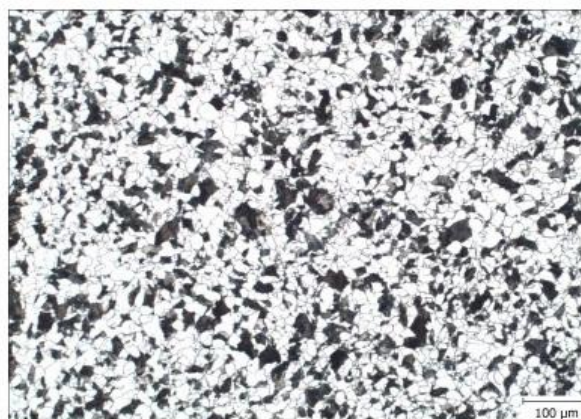
Řádkovitost / Zeilengefüge 2 / 2B ČSN 42 0469

Foto / Bild

vzorek 1 Probe 1

zvětšení  
vergrößert 100 X

leptáno  
geätzt 2 % Nital



### II. Zhodnocení / Bewertung : Zkoušené parametry dílů vyhovují TL 4521, EN 10084 a požadavkům výkresové dokumentace. Die Materialeigenschaften entsprechen TL 4521, EN 10084 und den Zeichnungsvorgaben.

<b>Rozdělovník</b> Verteiler	Vilím Milan VAH-2	Svačina Josef VAT-5	Albrecht Martin VAH-2	Podkovičák Josef VAT-3	<b>Vyjádření pracovníka VAT 5</b>
<b>Datum</b> 13.1.11	<b>Vypracoval</b> Erarbeitet <b>Ing. Jaroslava CHADIMOVÁ</b> Tel. +420 326 814082 <a href="mailto:jaroslava.chadimova@skoda-auto.cz">mailto:jaroslava.chadimova@skoda-auto.cz</a>	<b>Vedení laboratoře</b> Leitung Labor <b>Petr VENERA</b> Tel. +420 326 812935 <a href="mailto:petr.venera@skoda-auto.cz">mailto:petr.venera@skoda-auto.cz</a>			

Podepsaný originál protokolu je v případě potřeby k nahlédnutí v laboratoři.  
Der Unterschriebene Originalbericht kann im Bedarfsfall im Standortlabor eingesehen werden.

Příloha č. 6: Fotodokumentace kusu zpracovaného atmosférickou cementací s kalením  
v oleji a vakuovou cementací s kalením v přetlaku hélia



Kaleno v oleji (vlevo), kaleno přetlakem hélia (vpravo)